

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

## MIKROKONTROLÉRY PRO BLDC MOTORY

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. MARTIN ÚLEHLA

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

# MIKROKONTROLÉRY PRO BLDC MOTORY

MICROCONTROLLERS FOR BLDC MOTORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. MARTIN ÚLEHLA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. FILIP ORSÁG, Ph.D.

BRNO 2008

## Abstrakt

Diplomová práce pojednává o problematice řízení BLDC motorů (bezkartáčové stejnosměrné motory). Analyzuje dostupné mikrokontroléry a elektronické součástky na trhu, vhodné pro řízení BLDC motoru v podmínkách sériové výroby, problémy spojené s řízením motoru v rozličných provozních podmínkách a další pomocné metody (synchronizace, dynamické brzdění, rekuperace, konstantní otáčky).

## Klíčová slova

Mikrokontroléry, řízení pohonů, řízení otáček motoru, elektronický regulátor otáček, BLDC motory, senzorové BLDC motory, bezkartáčové stejnosměrné motory.

## Abstract

Master thesis deals with solutions of BLDC motors (brushless DC motors) control. It analyses microcontrollers and electronic components suitable for BLDC motor controllers under conditions of serial production. It mentions some common problems in practical application like dynamic motor braking, synchronization, recuperation and constant revolutions.

## Keywords

Microcontrollers, traction control, rpm motor control, electronic speed controller, BLDC motors, HAL BLDC motors, brushless DC motors.

## Citace

Martin Úlehla: Mikrokontroléry pro BLDC motory, diplomová práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2008

# Mikrokontroléry pro BLDC motory

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Filipa Orsága, Ph.D.

.....  
Martin Úlehla  
29. dubna 2008

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Grigoriji Dvorskému z firmy MGM Compro, Zlín za poskytnutí odborné pomoci a technického zázemí během tvorby diplomové práce.

© Martin Úlehla, 2008.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.*

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod do problematiky</b>	<b>3</b>
1.1	Základní informace o BLDC motoru	3
1.2	Cílová oblast aplikace	4
<b>2</b>	<b>Teorie</b>	<b>5</b>
2.1	Konstrukce BLDC motoru	5
2.2	Princip řízení BLDC motoru	8
2.2.1	Zjednodušený model BLDC motoru	8
2.2.2	Řízení BLDC motoru s využitím zpětného elektromotorického napětí	9
2.2.3	Další vliv amplitudy BEMF napětí	13
2.2.4	Princip řízení s využitím enkodérů	13
2.3	Princip dynamického brzdění motoru	15
2.4	Princip synchronizace a rekuperace	16
2.5	Princip řízení na konstantní otáčky	17
<b>3</b>	<b>Blokové schéma</b>	<b>18</b>
3.1	Napájení	18
3.2	Řízení	19
3.3	Diagnostika	19
3.4	Mikrokontrolér	20
3.4.1	Maximální otáčky	20
3.4.2	Komunikační periferie	20
3.4.3	Přesnost periferií	20
3.4.4	Elektrické a mechanické parametry	21
3.5	Silové obvody	22
3.6	Zpětné vazby	22
3.7	Shrnutí	22
<b>4</b>	<b>Hardware</b>	<b>23</b>
4.1	Napájecí obvody	23
4.2	Mikrokontrolér	26
4.2.1	ATMEL 89C2051	26
4.2.2	ATTiny2313	27
4.2.3	ATMega8	29
4.2.4	MC68HC908QY4	30
4.2.5	PIC	32
4.3	Zapojení mikrokontroléru ATMega8	32
4.3.1	Porty	33

4.3.2	Podpůrné obvody . . . . .	34
4.4	Silové obvody . . . . .	34
4.4.1	Bipolární tranzistory . . . . .	35
4.4.2	Unipolární tranzistory . . . . .	36
4.5	Zpětné vazby . . . . .	39
4.6	Shrnutí . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Software</b>	<b>42</b>
5.1	Architektura . . . . .	42
5.2	Diagnostika . . . . .	43
5.2.1	Pasivní měření . . . . .	43
5.2.2	Aktivní ochrana . . . . .	43
5.3	Snímání zpětných vazeb . . . . .	44
5.3.1	Fáze rozběhu . . . . .	44
5.3.2	Fáze běhu . . . . .	45
5.4	Generování PWM . . . . .	46
5.5	Komutace . . . . .	47
5.6	Řízení . . . . .	48
5.6.1	Snímání uživatelských tlačítek . . . . .	48
5.6.2	Akcelerace, decelerace, PWM . . . . .	49
5.6.3	Komunikační možnosti . . . . .	49
5.7	Ovládání . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>51</b>
6.1	Aplikace BLDC pohonů . . . . .	51
6.2	Zhodnocení a odchylky implementovaného řešení . . . . .	51
<b>A</b>	<b>Příloha</b>	<b>54</b>

# Kapitola 1

## Úvod do problematiky

V několika posledních letech se v průmyslových aplikacích začíná objevovat nová technologie pohonu, dříve známá spíše modelářům - BLDC motory. V oboru informačních technologií se BLDC motory objevily již dříve v pohonu disků a ventilátorů, ale do průmyslu si přes své nesporné výhody prorazily cestu teprve nedávno. Tato práce si bere za úkol navrhnout a realizovat elektronický mikrokontrolérem řízený regulátor, který by byl schopen řídit BLDC motor.

BLDC motory<sup>1</sup> spojují většinu výhod motorů stejnosměrných i střídavých. Zejména jde o spolehlivost a jednoduchost konstrukce, kterou tyto motory převzaly od motorů střídavých, jednoduchost regulace výkonu (silové části regulátoru), efektivitu a točivý moment stejnosměrných motorů. Svými výhodami BLDC motory bohatě vynahrazují potřebu složitějších řídicích obvodů nutných pro jejich provoz zejména tam, kde je nezbytné přesně regulovat výkon či otáčky motoru.

### 1.1 Základní informace o BLDC motoru

Základní vlastnosti BLDC motoru [16] jsou převzaty ze stejnosměrných motorů [13]. Stejně jako stejnosměrný motor obsahuje i BLDC motor permanentní magnety. Budící vinutí se pro vytvoření magnetického pole nevyužívá. Permanentní magnety, umístěné u stejnosměrných motorů ve statoru, jsou u BLDC motoru rozloženy po obvodu rotoru. Většina BLDC motorů je proto konstruována jako tzv. oběžníky. Existují klasicky uspořádané BLDC motory s vnitřním rotorem, avšak omezené množství prostoru uvnitř statoru limituje maximální počet magnetických pólů. Redukcí počtu pólů snižujeme také poměr elektrických otáček k mechanickým a zvyšujeme provozní otáčky motoru. Jelikož však v reálném provozu vyžadujeme mechanické otáčky v řádu stovek, maximálně tisíců otáček za minutu, používají se především motory vícepólové, oběžné (viz 2.1).

Podobně jako počty pólů mohou mít motory i různé počty vinutí statoru – fází. Běžné jsou třífázové motory. Více než tři fáze se nepoužívají u běžných motorů z důvodu potřebného počtu spínacích prvků výkonového stupně regulátoru, méně než tři fáze se používají jen u velmi malých motorků, např. u ventilátorů v PC.

Hlavním rozdílem mezi stejnosměrným a BLDC motorem je systém, jakým udržují svůj rotor v chodu. U stejnosměrných motorů se stará o přepínání vinutí a udržování správného magnetického pole uvnitř motoru mechanický komutátor, tj. plošky mědi na rotoru na které dosedají uhlíkové sběrače. Tento systém je nejčastějším zdrojem problémů stejnosměrných

---

<sup>1</sup>Brushless Direct Current Motor = bezkartáčový stejnosměrný motor

motorů. Uhlíky se opotřebovávají, vzniká nežádoucí jiskření vytvářející širokopásmové elektromagnetické rušení a teplo.

BLDC motor nemá žádný komutátor, jednotlivé cívky vinutí motoru jsou součástí statoru a jsou vyvedeny na svorkovnici motoru. BLDC motory mají obvykle tři vinutí (fáze), které se mohou podobně jako u střídavého motoru zapojit do hvězdy či trojúhelníku. Přepínání napájecího napětí do těchto cívek zajišťuje elektronický regulátor, který je nutné k motoru vždy připojit. Regulátor snímá za chodu motor a zpětná vazba mu umožňuje přepínat napětí na fázích (komutovat) v takovém sledu, aby motor korektně pracoval. Principy komutace budou vysvětleny níže (viz 2.2). *BLDC motor není schopen funkce bez řídicího regulátoru!*

## 1.2 Cílová oblast aplikace

Výhodami BLDC motoru, jak již bylo výše uvedeno, je jeho spolehlivost, jednoduchá konstrukce, absence elektromagnetického rušení od komutátoru, delší životnost bez nutnosti údržby a zejména výkon. BLDC motory mají nedostižný poměr hmotnost/výkon a velmi vysoké dosažitelné otáčky v řádech desítek tisíc otáček za minutu, neomezené limitujícími silami na komutátoru (tření, výboje).

BLDC motory jsou efektivnější než střídavé i stejnosměrné motory. Maximální dodaný výkon je omezen pouze tepelným poškozením vodiče vinutí a demagnetizací permanentních magnetů vlivem tepla. Motor má nejznatelnější nárůst výkonu oproti motorům stejnosměrným zejména v oblasti žádné až nízké zátěže, při vysokém zatížení jsou kvalitní stejnosměrné a BLDC motory srovnatelné.

BLDC motory se začínají prosazovat v průmyslových aplikacích, kde je potřeba velmi spolehlivý motor o velkém výkonu, není k dispozici střídavé napětí, či je potřeba řídit motor přesně.

Takovými aplikacemi jsou například pohony aut, mopedů či elektrokol, vodních a podvodních skútrů, všude tam kde jsme nuceni dodat vysoké výkony s použitím bezpečného stejnosměrného napětí z baterií nebo vystačit s omezeným prostorem pro výkonnou pohonnou jednotku.

U pohonu kritických systémů v průmyslu, například mazacích či chladících čerpadel, oceníme již z principu řízení nezbytnou zpětnou vazbu od motoru, kdy regulátor přesně zná otáčky motoru a to, zda se motor točí či vlivem poruchy nikoliv. Stejným způsobem je regulátor BLDC motoru schopen dodávat data o ujeté vzdálenosti (odometrii), potřebná při řízení robotů z počtu vykonaných elektrických otáček (vysvětlení viz 2).

Použití BLDC motor je vhodné všude tam, kde je potřeba inteligentního řízení otáček motoru (v závislosti na různých stavech systému), kde je řídicí elektronika motoru nezbytná. Regulátor pak může zvládat řízení BLDC motoru bez znatelného zvýšení ceny celého systému.



# Kapitola 2

## Teorie

Řízení BLDC motoru vyžaduje znalost alespoň základní teorie z oboru elektromotorů. Teoretické znalosti jsem čerpal zejména z aplikačních doporučení předních výrobců mikrokontrolérů, firem Atmel a Freescale. Detaily praktické aplikace z dlouholetých zkušeností firmy MGM Compro.

### 2.1 Konstrukce BLDC motoru

Základy konstrukce BLDC motoru vycházejí ze standardních stejnosměrných komutátorových motorů. Hlavním konstrukčním rozdílem mezi stejnosměrnými komutátorovými a BLDC motory je prohození funkce statoru a rotoru. Zatímco u stejnosměrného motoru jsou magnety součástí statoru a rotor tvoří vinutí, u BLDC motoru je rotor složen z permanentních magnetů a stator tvoří fázová vinutí.



Obrázek 2.1: Principiální nákres stejnosměrného komutátorového motoru [16].

Konstrukční rozdíly jsou dány rozdílem ve funkci obou motorů. Stejnosměrný motor vyžaduje přepínání napájení pro vinutí mechanickým komutátorem, vinutí je tedy součástí rotoru a proud se do něj přivádí přes uhlíkové sběrače. Komutátor představuje elektrický odpor, kde vznikají značné ztráty, vinutí je navíc namáháno otáčením rotoru. Standardní stejnosměrný motor má pouze jediný pár magnetů statoru, vůči kterému má magnetické

pole rotoru konstantní předstih. Předstih udržuje otáčející se mechanický komutátor a je pevně daný vzájemným postavením magnetů statoru vůči uhlíkovým sběračům.

BLDC motor má stator tvořený fázovým vinutím a rotor s permanentními magnety. Toto uspořádání má výhody na straně rotoru i statoru.



Obrázek 2.2: Statorové vinutí BLDC motoru.

Fázová vinutí vedená dutinou statoru mohou mít větší průřez a umožňují dodat do motoru větší množství elektrické energie. Vinutí je obvykle tvořeno více vodiči vinutými paralelně. Svazek drátů má nižší mechanickou tuhost a jednodušeji se vine do dutin statoru. Množství energie dodané do motoru se reguluje pulzně šířkovou modulací s kmitočty 8, 16 či 32 kHz v závislosti na indukčnosti připojeného motoru. Proto je pro vinutí vhodnější více paralelních vodičů i z hlediska elektrického. Ve vodiči se s rostoucím kmitočtem zvyšuje tzv. skin efekt, kdy jsou elektrony vytlačovány ze středu vodiče. S rostoucím kmitočtem roste odpor vodiče, klesá elektrický proud motorem a stoupá teplota vodiče.

Rotor je tvořen permanentními magnety, které jsou uspořádány do pólových dvojic. Motor může mít libovolný počet těchto dvojic, omezený pouze volným prostorem, který může rotor vyplnit. Na počtu pólových dvojic pak závisí provozní otáčky motoru.



Obrázek 2.3: Rotor oběžného BLDC motoru.

U BLDC motoru rozlišujeme dvě hodnoty počtu otáček za minutu, elektrické a mechanické.

Elektrickými otáčkami popisujeme počet kompletních cyklů přepnutí napájecího napětí ve všech fázích motoru (6 komutací, viz 2.2) za minutu. Maximální elektrické otáčky BLDC motoru závisí pouze na množství energie, kterou jsme schopni do motoru dodat, aniž by byl

fyzicky poškozen (tepelným působením protékajícího proudu na vodiče, ohřátím magnetů či dynamickou nevyvážeností rotoru). Při konstantním napájecím napětí je pak dodatečný výkon do motoru závislý na jeho indukčnosti (charakteristice jádra, magnetů a počtu závitů fázových vinutí).

Mechanická otáčka představuje jedno otočení hřídele rotoru. Mechanické otáčky motoru jsou v přímém vztahu k elektrickým otáčkám (synchronní motor), a jsou závislé na počtu pólových dvojic magnetů rotoru. Platí následující vztah:

$$Otacky_{mechanicke} = Otacky_{elektricke} / pocetPolovychDvojic$$

Otáčky lze za chodu motoru regulovat pouze velikostí dodané energie. Jelikož indukční charakteristika motoru je pro námi požadovaný výkon daná jeho konstrukcí, a pro vysoké výkony mají nízkoindukční motory velmi vysoký počet elektrických otáček (v řádu desítek tisíc), redukuje mechanické otáčky motoru volbou vhodného množství pólových dvojic. Teprve pokud nelze použít vysoký počet pólových dvojic z důvodu nedostatku prostoru pro rotor, redukuje otáčky mechanickými převodovkami. Ve většině praktických aplikací vyžadujeme mechanické otáčky maximálně v řádu tisíců otáček za minutu, pomaloběžné motory proto mají i několik desítek pólových dvojic.

Je zřejmé, že klasické mechanické uspořádání motoru s rotorem uvnitř statoru není vhodné pro realizaci mnohapólových motorů bez značného zvětšení obvodu motoru. U BLDC motoru nic nebrání umístit rotor vně statoru a získat tím prostor pro permanentní magnety. Proto se BLDC motory ve velké míře vyrábí jako oběžníky.



Obrázek 2.4: Příklad oběžného motoru firmy MPJet.



Obrázek 2.5: Průmyslový vysokootáčkový BLDC motor klasické konstrukce.

## 2.2 Princip řízení BLDC motoru

Principy řízení BLDC motoru jsem čerpal z dostupné literatury firem Atmel [6], [5] a Freescale [15].

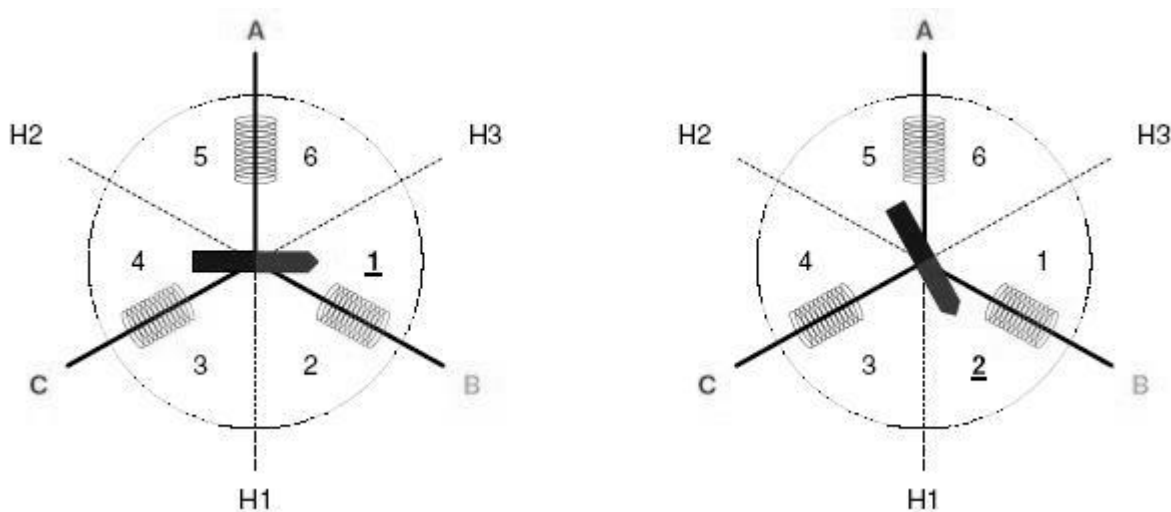
BLDC motor vyžaduje pro svůj běh elektronický regulátor otáček, který svou funkcí zastupuje mechanický komutátor klasického stejnosměrného motoru. Nejdůležitější funkcí regulátoru otáček BLDC motoru je detekovat okamžik, kdy je optimální přepnout napájecí napětí na svorkách motoru. Tento okamžik je jednoznačně dán polohou magnetického obvodu rotoru vůči statorovému fázovému vinutí.

Existují dva způsoby, jakými lze zjistit polohu rotoru BLDC motoru. Prvním z nich je detekce pomocí přímé zpětné vazby z vinutí motoru. Při použití této metody nejsou vyžadována žádná další zařízení pro snímání polohy rotoru vůči statoru. Napětí na fázi, která není připojena ke zdroji napětí, je úměrné poloze rotoru a lze snímat mikrokontrolérem. Způsob bude detailně rozebrán v této kapitole.

Druhou možností je snímat hřidel rotoru s pomocí enkodérů. V praxi se obvykle používají HALovy sondy umístěné ve statoru motoru. Řízení HALovými sondami bude popsáno v kapitole 2.2.4.

### 2.2.1 Zjednodušený model BLDC motoru

Zjednodušený principiální model BLDC motoru (obr. 2.6) se skládá ze tří cívek statorového vinutí, uspořádaných po 120 stupních a rotoru tvořeného jedním permanentním magnetem. Existuje šest rovnovážných poloh, které může rotor zaujmout v závislosti na napájení cívek statoru.

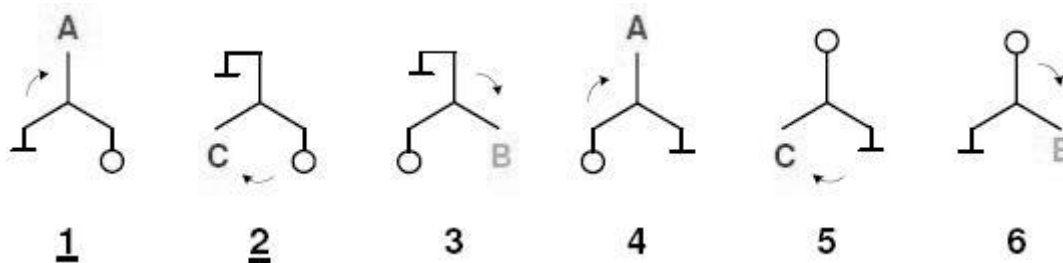


Obrázek 2.6: Zjednodušený model BLDC motoru [6].

Elektrická energie je přiváděna na vývody A, B a C. Každý sektor mezi fázovými vinutími po 120° je rozdělen na 60° sektory. Rotor má 6 rovnovážných poloh 1-6.

Pokud přiložíme napájecí napětí na některou dvojici vývodů motoru, rotor zaujme jednu ze šesti rovnovážných poloh zobrazených na výše uvedeném obrázku. Například přiložíme-li kladný pól napájecího napětí na vývod B a záporný pól na vývod C, proud teče ve směru  $B \rightarrow C$  a rotor zaujme rovnovážnou polohu označenou číslem 1.

Změnou napájení cívek statoru posunem záporného napájecího pólu na vývod A změníme průtok proudu na směr  $B \rightarrow A$  a rotor přechází do rovnovážné polohy 2. Změnu napájení cívek motoru nazýváme *komutací*. Sekvencí komutací můžeme provést úplnou otáčku rotoru posloupností  $B \rightarrow C$ ,  $B \rightarrow A$ ,  $C \rightarrow A$ ,  $C \rightarrow B$ ,  $A \rightarrow B$ ,  $A \rightarrow C$ .



Obrázek 2.7: Detailní náčrt komutací BLDC motoru [6].

Kroužek znázorňuje vývod připojený na kladný pól zdroje, vývod označený písmenem je ve vysoké impedanci, uzemněný je připojen k zápornému pólu.

Jestliže tuto sekvenci opakujeme periodicky, BLDC motor se plynule otáčí (obr. 2.7). Je tedy zřejmé, že jedna elektrická otáčka motoru vyžaduje sekvenci šesti komutací. Komutace jsou naznačeny na motoru zapojeném do hvězdy (Y). Bez obměny lze však následující schéma aplikovat i na motor zapojený do trojúhelníku (D).

Z principiálního náčrtu komutací BLDC motoru je vidět, že v každé komutační periodě je jeden fázový vývod motoru nezapojený, je ve stavu vysoké impedance. Na tomto nezapojeném vývodu lze naměřit napětí, které je *úměrné poloze rotoru vůči statoru*. Napětí nezapojené fáze je zásadní veličina pro komutaci BLDC motoru metodou zpětných vazeb bez přímého snímání polohy rotoru enkodéry.

### 2.2.2 Řízení BLDC motoru s využitím zpětného elektromotorického napětí

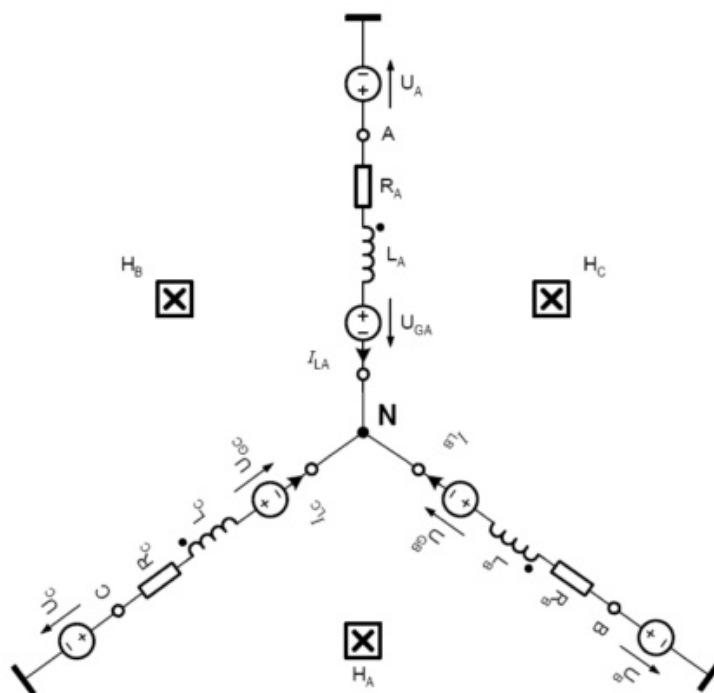
Jako každé elektrické zařízení lze i BLDC motor definovat náhradním elektrickým schématem (obr. 2.8). Ze schématu je zřejmý princip detekce polohy rotoru napětím volné fáze.

Otáčející se rotor BLDC motoru indukuje v cívkách statoru elektromotorické napětí (back electromotive force, dále pouze BEMF) působící za provozu proti napětí napájecímu. Jeho amplituda je úměrná rychlosti otáčení rotoru, jeho průběh aktuální polohy rotoru vůči statoru. Pokud otáčíme rotorem BLDC motoru vnější silou, má napětí na všech cívkách měřené proti středu sinusový průběh, posunutý navzájem o  $120^\circ$  (obr. 2.9, 2.10).

Jak již víme z předchozí kapitoly, elektrický proud protéká při provozu motoru pouze dvěma cívkami, třetí vývod motoru je ve stavu vysoké impedance. Změříme-li na tomto vývodu elektromotorické napětí ihned po komutaci a jeho přechodu do vysoké impedance zjistíme, že jeho směr je souhlasný s napětím napájecího zdroje a další komutace v tento okamžik by způsobila velmi vysokou proudovou špičku a silové působení *proti* otáčení rotoru.

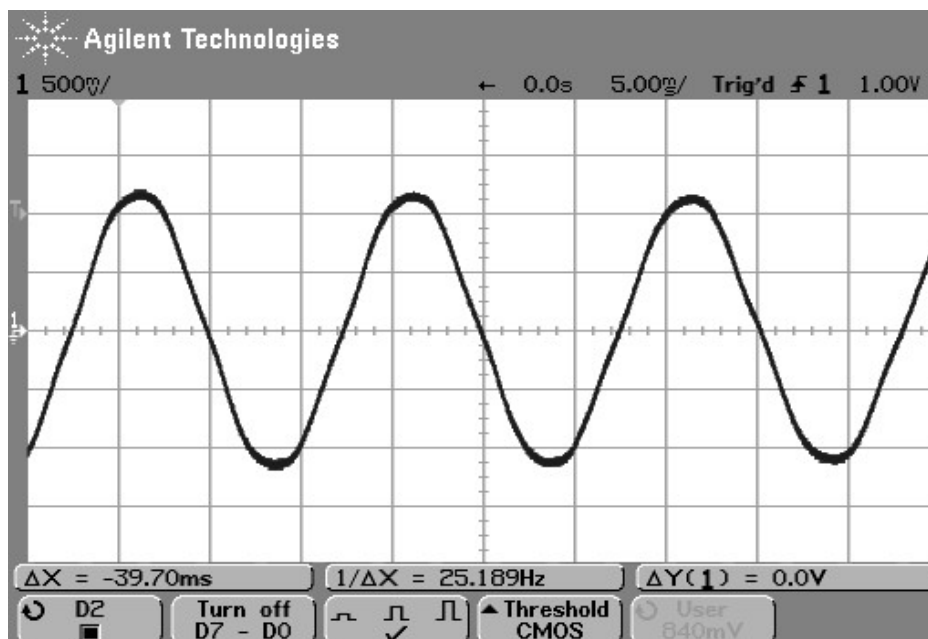
Dalším otáčením rotoru BLDC motoru se mění pozice cívky ve vysoké impedanci vůči magnetům rotoru a také napětí na ní indukované. Jeho amplituda klesá až dosáhne nulové hodnoty. Okamžik průchodu napětí nulou je optimální okamžik, kdy můžeme komutovat, a tím nedestructivně přepojit napájecí napětí na doposud volný vývod motoru.

Přepojíme-li napájecí napětí po tomto okamžiku, není to destruktivní pro motor ani regulátor, avšak zkracujeme dobu kdy dodáváme výkon ze zdroje elektrického napětí a výkon motoru klesá. V praktické aplikaci se někdy uměle zpožďuje komutace u motorů, kde má



Obrázek 2.8: Elektrické náhradní schéma motoru BLDC v zapojení Y [6].

$U_A, U_B, U_C$  je vnější napětí zdroje,  $U_{GA}, U_{GB}, U_{GC}$  je zpětné elektromotorické napětí generované otáčejícím se motorem. Spolu s elektrickým odporem vinutí (konstantní složka  $R$  + kmitočtově závislá  $L$ ) omezuje energii, kterou jsme schopni motoru dodat.

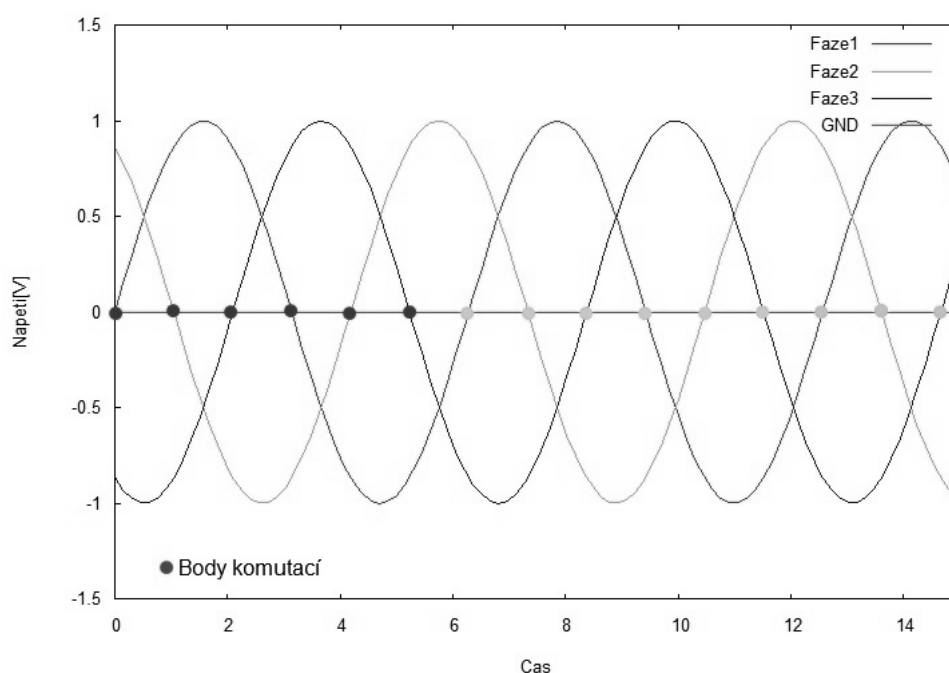


Obrázek 2.9: Průběh napětí cívky otáčejícího se BLDC motoru. Napětí měřené na fázi BLDC motoru otáčejícího se vnější silou proti středu.

zpětné napětí (BEMF) malou amplitudu a může dojít k předčasné detekci průchodu nulou. Zpoždění komutace pak sice sníží teoreticky dosažitelný výkon motoru, avšak nekorektní komutace mohou zcela znemožnit běh motoru. Zpožděním připojení napájecího napětí se pak dostáváme do korektní oblasti, kde již komutace není destruktivní, přestože byla detekována předčasně.

Přepojíme-li napětí dříve, může výsledná proudová špička způsobit nejen zbrždění otáčejícího se motoru, ale i úplnou destrukci regulátoru proudovou špičkou, či mechanickou destrukci motoru setrvačnými silami.

Při komutacích se střídají okamžiky kdy přepojujeme kladný a kdy záporný pól, stále však platí, že hledáme okamžik, kdy indukované napětí začíná působit *proti* napájecímu napětí, které chceme připojit na cívku motoru. Liší se pouze směr, tj. zda napětí směrem k nule stoupá při změně připojení kladného pólu zdroje, či klesá při přepojení pólu záporného (obr. 2.10).



Obrázek 2.10: Body korektní komutace BLDC motoru.

Průběh fázových napětí BLDC motoru otáčejícího se vnější silou. Zvýrazněny jsou body průchodu nulou (komutací), odlišeny jednotlivé elektrické otáčky.

Zdánlivě tedy stačí pouze měřit BEMF napětí generované cívku na vývodu motoru ve vysoké impedanci, avšak praxe je jiná.

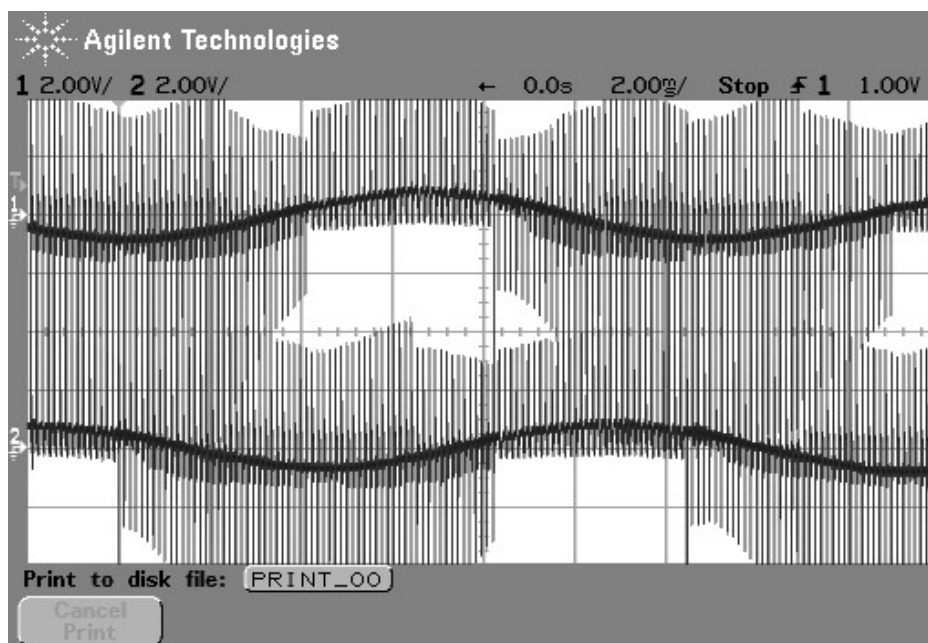
### Praktické problémy řízení pomocí BEMF

Prvním problémem který musíme řešit je rychlost. BLDC motory dosahují mnohdy až 100 000 elektrických otáček za minutu. Jednoduchým výpočtem zjistíme, že bychom museli provést *několikanásobně více než 600 000 měření A/D* převodníkem. To není možné se žádným běžně dostupným mikrokontrolérem.

Pro měření BEMF napětí se proto využívají komparátory, kterými detekujeme pouze okamžik průchodu nulou. Komparátor nám však nic neříká o rychlosti poklesu napětí cívky

a neumožní matematickou korekci zpětné vazby výpočtem očekávaného bodu průchodu nulou.

K problému neznalosti průběhu napětí na cívce se přidává problém nízkého BEMF napětí při pomalém otáčení motoru či při méně kvalitním magnetickém obvodu motoru. Signál z komparátoru musíme filtrovat a interpretovat v závislosti na současném stavu systému (obr. 2.11).



Obrázek 2.11: Signál pro komparátor z pomalu běžícího BLDC motoru.  
Reálný průběh fázových napětí otáčejícího se BLDC motoru.

Zpětné elektromotorické napětí nelze měřit proti zápornému pólu napájecího napětí mikrokontroléru ani žádnému statickému napětí. Napětí středního bodu motoru se během provozu dynamicky mění a právě vůči tomuto napětí je nutné měřit zpětné elektromotorické napětí na vývodu motoru ve vysoké impedanci. Teoreticky lze vyvést střední bod na svorkovnici motoru. To je však možné pouze u motoru v zapojení do hvězdy (Y), ale ne u motoru zapojeného do trojúhelníku (D) (obr. 2.12).

V praxi ani u motoru zapojeného do hvězdy není zvykem vyvést střední bod cívek motoru (N) na svorkovnici motoru. Tento střed si tedy musíme vytvořit uměle. Způsob jak toho dosáhnout se týká hardwaru regulátoru a bude popsán později.

### Omezení aplikace motorů řízených pomocí BEMF

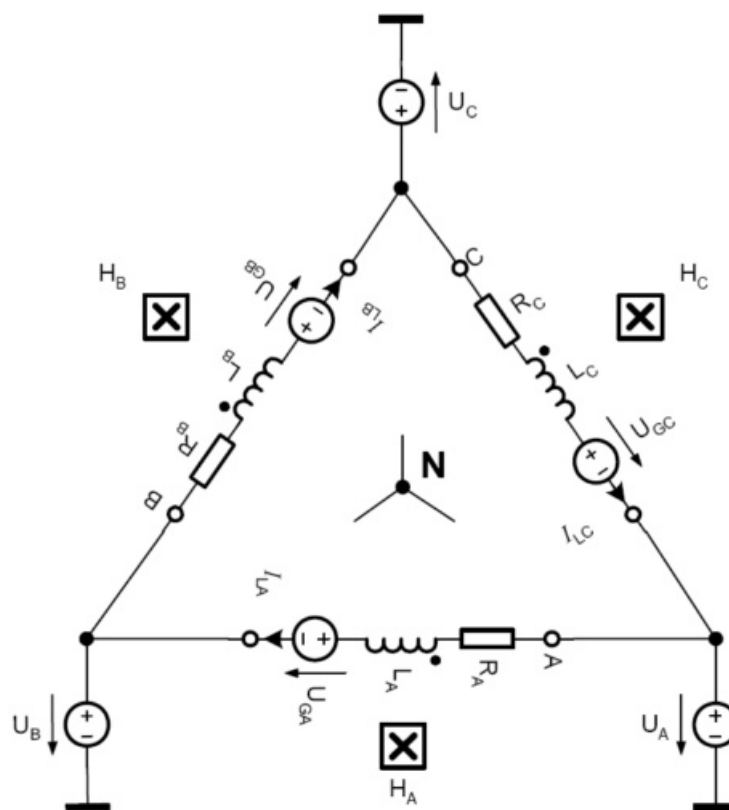
Jak bylo zmíněno výše, amplituda BEMF napětí je úměrná rychlosti otáčení rotoru BLDC motoru. Při nulových otáčkách je napětí nulové a tímto napětím nelze řídit komutace.

Jediným způsobem jak dosáhnout roztočení BLDC motoru řízeného pomocí BEMF napětí je sérií uměle časovaných komutací při omezeném dodaném výkonu (aby nedošlo k nadproudovému zničení regulátoru či vinutí motoru) dosáhnout pohybu rotoru.

Rozechvěním rotoru začíná motor generovat BEMF napětí, pomocí kterého již můžeme zahájit korektní komutační sekvenci a udržovat motor v chodu.

U aplikací, kde je na hřídeli motoru připojena zátěž, která nedovolí alespoň minimální





Obrázek 2.12: Elektrické náhradní schéma motoru BLDC v zapojení D [6].

pohyb hřídele motoru, nelze BLDC motor provozovat metodou detekce BEMF, ale je třeba využít HALovy sondy, viz 2.2.4.

### 2.2.3 Další vliv amplitudy BEMF napětí

V neposlední řadě má velikost generovaného elektromotorického napětí přímý vliv na dosažitelné maximální elektrické otáčky motoru. Se vzrůstem otáček rotoru BLDC motoru se zvyšuje také amplituda BEMF napětí a snižuje napěťový spád mezi zdrojem elektrického napětí a svorkami motoru, kam je napájecí napětí připojeno. Klesá elektrický proud motorem a dodávaný výkon.

Motor se tedy při konstantní zátěži stabilizuje na otáčkách, kde se vyrovná množství energie dodávané zdrojem (omezené zvyšujícím se BEMF napětím) s potřebným množstvím energie pro udržení motoru v chodu.

### 2.2.4 Princip řízení s využitím enkodérů

Druhou možností jak snímat polohu rotoru BLDC motoru a korektně provádět komutace je přímé snímání hřídele motoru enkodéry.

Existuje mnoho typů enkodérů. Pro řízení BLDC motoru jsou vhodné dva typy. První typ jsou HALovy sondy, druhým typem jsou infračervené světelné závory.

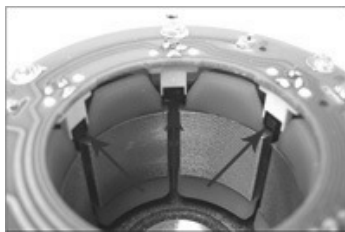
Halovy sondy pracují na principu omezení průchodu elektrického proudu destičkou polovodiče okolním magnetickým polem. Dostane-li se HALova sonda do magnetického pole,

zvýší elektrický odpor, který klade protékajícímu proudu a stoupne na ní měřitelný úbytek napětí.

Halovy sondy jsou nejčastěji využívané enkodéry pro řízení BLDC motorů. Při jejich použití lze totiž s výhodou využít stávající permanentní magnety rotoru. Používají se sondy, které již mají předzpracovaný výstup a generují TTL signál 0-5V. Sondy se pak umístí mezi statorové vinutí a rotor tak, aby hrany, které generují přímo a ideálně bez posunu, odpovídaly průchodu nulou v příslušné fázi. Pro každou fázi se používá samostatná sonda.

Druhou využívanou možností jsou infračervené závory. Zásadní výhodou snímání polohy rotoru BLDC motoru světelnou závorou je možnost umístit celý systém mimo aktivní zónu motoru. Halovy sondy mohou být ovlivněny silnými elektromagnetickými poruchami, které mohou vzniknout v motoru při nerovnoměrném chodu, kdy je vliv magnetického pole rotoru na HALovy sondy narušen magnetickým polem statoru.

V případě umístění zcela mimo motor je však kritické zajistit, aby celá snímací část nemohla změnit svou polohu vůči statoru a rotoru BLDC motoru.



Obrázek 2.13: Osazení enkodérů (HAL) ve statoru BLDC motoru.  
Ukázka praktického provedení HALových sond.

U správně umístěného snímacího zařízení získáme signály pro řízení BLDC motoru zobrazené na obrázku 2.14. V horní části je zobrazen signál dvou sousedních fází, ve spodní části pak signál enkodérů, kde první dva průběhy odpovídají analogově zobrazeným fázím.

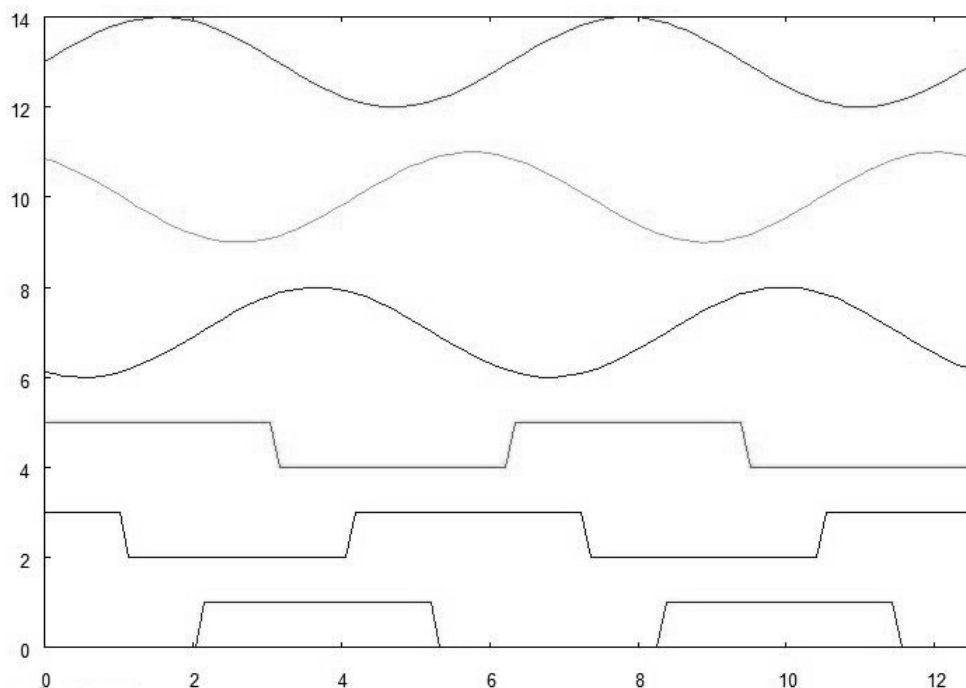
### Výhody a nevýhody řízení enkodéry

Hlavní výhodou řízení BLDC motoru enkodéry je schopnost snímat polohu motoru při nulových otáčkách. Jedině s pomocí enkodérů jsme tak schopni vyvinout plný výkon BLDC motoru už od nulových otáček. Enkodéry je nutné použít tam, kde nelze dosáhnout minimálních otáček rotoru uměle časovanou sekvencí komutací.

Řízení BLDC motoru pomocí enkodérů se stává triviální informatickou úlohou. V každý okamžik víme, v jaké poloze se nachází rotor BLDC motoru a na kterou dvojici fází motoru přiložit napětí v příslušné polaritě. Odpadá značná režie zpracování zašuměného výstupu komparátoru při použití metody detekce pomocí BEMF.

Přestože se zdá, že snímání motoru enkodéry je výhodnější, v praxi tomu bývá právě naopak, převažuje řízení pomocí BEMF. Následující odstavce vysvětlí důvody, které vedou k tomuto stavu.

Jak bylo uvedeno dříve, zásadní výhodou BLDC motorů proti ostatním typům je spolehlivost. Řízení motorů s pomocí enkodérů vyžaduje mimo tří fázových přívodů vedení až pět dalších vodičů s napájením a signálem enkodérů k motoru. Porucha signálu od enkodéru bývá kritická a motor je nutné ihned zastavit. Motor ani regulátor nebývají dimenzované na proud protékající vinutím trvale a tato situace může při poruše nastat. Je zřejmé, že v průmyslovém prostředí je porucha pěti signálových vodičů malého průřezu mnohem pravděpodobnější, než silového třífázového vedení.



Obrázek 2.14: Signály enkodérů z motoru.

Směrem shora dolů k sobě přísluší fázový průběh napětí (sinusoida) na fázi motoru a logický signál enkodéru (hrana signalizuje průchod napětí nulou).

Selhání enkodérů nemusí pocházet pouze od přerušení signálových vodičů. Nezanedbatelná je také možnost selhání samotného snímacího zařízení nebo jeho posun vůči statoru či rotoru BLDC motoru. Enkodéry uvnitř motoru se nacházejí v prostředí silného mechanického namáhání (zejména otřesy) a v oblasti velmi silného magnetického pole. V případě snímání optického pak musí být zabráněno vnikání nečistot do enkodéru.

U BLDC motorů malých rozměrů není vůbec možné zabudovat snímací systém do motoru, a ne vždy je ho možné k motoru připojit externě. Cena motoru se snímacím zařízením je výrazně vyšší, než v případě motoru řízeného pomocí BEMF napětí.

Nejzásadnějším důvodem proti je odchylka signálu enkodérů od průchodu nulou příslušné fáze oproti ideálnímu případu. Regulátor pro motor řízený s pomocí enkodérů je více či méně řešením na míru pro konkrétní typ motoru, a není možné aby stejný regulátor byl připojen k jakémukoliv motoru. Není-li posun velký, ztrácíme pouze část účinnosti motoru, avšak může dojít až k úplné nefunkčnosti s daným motorem.

Oproti tomu regulátor řídící motor pomocí BEMF napětí je možné připojit k libovolnému BLDC motoru až do proudové zatížitelnosti hardwaru regulátoru a shodný algoritmus může řídit regulátor pro 10 W stejně dobře jako pro 100 kW.

## 2.3 Princip dynamického brzdění motoru

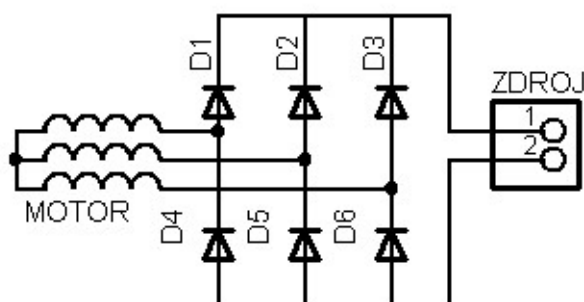
Pokud od otáčejícího se BLDC motoru odpojíme napájecí napětí, chová se jako vícepólový synchronní alternátor a generuje elektrickou energii. Jde o stejné BEMF napětí, které nám umožňuje řídit BLDC motor pomocí zpětné vazby.

Spojíme-li fázové vývody motoru nakrátko, napětí, které motor generuje, působí proti

jeho pohybu, a motor velmi efektivně brzdí úměrně jeho aktuální rychlosti otáčení. Lze tak urychlit zastavení motoru i připojeného zařízení pokud má dlouhou dobu setrvačného doběhu.

Přímý zkrat fází motoru však není principiálně možný. Proudová špička zkratového proudu otáčejícího se BLDC motoru by byla natolik velká, že by mohla způsobit poškození silové části regulátoru proudovým impulzem a připojeného zařízení příliš agresivním zabrzděním (mechanickou destrukcí). Vhodně modulovaným spínáním silové elektroniky regulátoru můžeme relativně snadno dosáhnout efektu plynulého zabrzdění motoru pomocí pulzně-šířkové modulace.

Dynamické brzdění není možné provádět při napájení regulátoru otáček ze zdroje. Při spojování motoru nakrátko (pomocí pulzně-šířkové modulace) se v době rozepnutí silových prvků motor chová jako standardní indukční zátěž napájená konstantním proudem při odpojení. Po odepnutí pulzu brzdící PWM se indukované napětí na motoru několikanásobně zvýší a přes ochranné diody spínacích tranzistorů (schéma 2.15) proniká do napětí napájecího. Není-li zdroj schopen absorbovat tuto energii, napětí stoupá až na desetinásobky běžné hodnoty a dochází k destrukci elektroniky zdroje i regulátoru otáček (obrázek 2.16) napětovým průrazem.



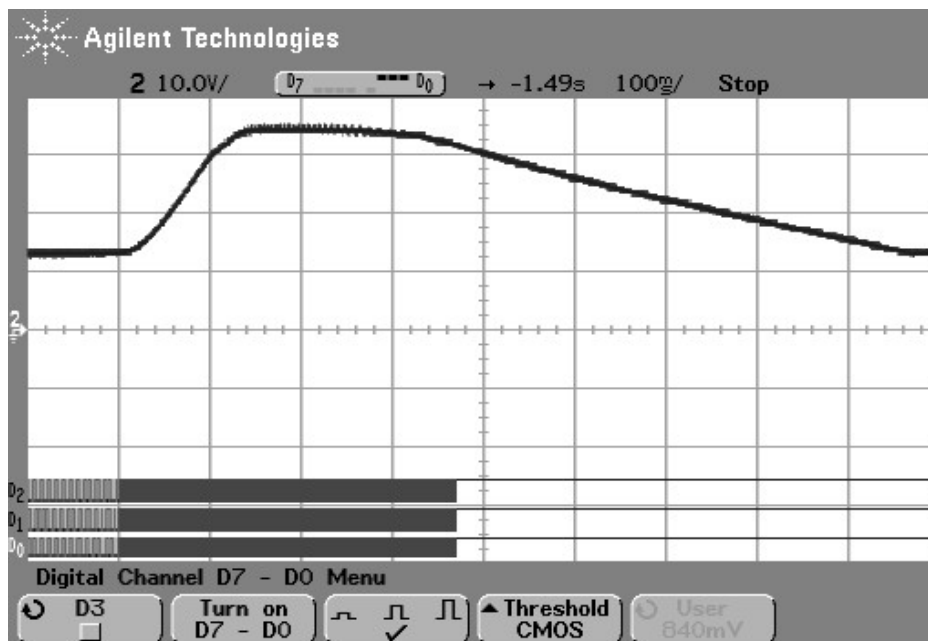
Obrázek 2.15: Principiální schéma brzdícího BLDC motoru.  
Energie z vinutí BLDC motoru se vrací přes ochranné diody (součást spínacích tranzistorů či diskretní součástky) na svorky zdroje.

## 2.4 Princip synchronizace a rekuperace

U bateriově poháněných zařízení, jako jsou elektrokola či elektroskútry, má zásadní význam možnost rekuperace, tj. navrácení energie otáčejícího se motoru zpět do baterie. Přes nevysokou účinnost rekuperace (cca 30%) je každé zvýšení dojezdu vozidla vítané.

Částečná rekuperace je popsána v oblasti dynamického brzdění, tento způsob je však nepoužitelný. Většina energie se mění na teplo a jen velmi malé impulzy vracíme zpět do baterie. Vnitřní ochranné diody spínacích tranzistorů nemají vhodné elektrické vlastnosti pro přenos výkonů, úbytky na nich jsou velké a cenná energie se vyzařuje do prostoru ve formě tepla.

Cestou jak dosáhnout rekuperace u BLDC motoru je posun v průbězích spínání jednotlivých vinutí motoru. Pokud spínáme výkonové prvky regulátoru s vhodným posunem, otáčející motor brzdíme místo jeho udržování v chodu a jeho energie je směřována přes ochranné diody zpět do zdroje. Zdroj musí být schopen tuto energii absorbovat.



Obrázek 2.16: Plynulé zabrzdění BLDC motoru do zdroje.

Brzdění motoru do zdroje, který není schopen absorbovat energii motoru. I při brzdění motoru bez zátěže s nízkou setrvačností se svorkové napětí zvýší z 12 V na 35 V!

Jak bylo zmíněno dříve jsou elektrické vlastnosti ochranných diod spínacích tranzistorů nevalné, proto spínání tranzistoru v okamžik, kdy má téct proud jeho ochrannou diodou, dramaticky zvýší účinnost rekuperace. Rekuperace vyžaduje zdroje jak ve formě přidaného kódu, tak hardwarových periférií mikrokontroléru regulátoru. Musíme provést zásadní změnu ve spínacích průbězích komutací i v přesném posunu časování komutační sekvence.

Rekuperace se v drtivé většině průmyslových aplikací BLDC motorů nevyužívá pro její systémovou náročnost a nízkou účinnost.

## 2.5 Princip řízení na konstantní otáčky

U jistých aplikací vyžadujeme udržování konstantních otáček bez ohledu na změnu zatížení motoru. Při použití BLDC motoru a regulátoru řešíme tento problém velmi snadno. Jak bylo již uvedeno dříve, regulátor přesně zná rychlost otáčení BLDC motoru a tento údaj dokáže korigovat 3-6 krát za jednu elektrickou otáčku.

K regulaci na konstantní otáčky se využívá PID<sup>1</sup> regulátoru optimalizovaného na příslušný mechanický systém. Problémem který se musí řešit, jsou setrvačné a mechanické parametry připojeného systému. Regulátor pro řízení konstantními otáčkami je nutné vytvářet či alespoň nastavit na míru řízeného systému.

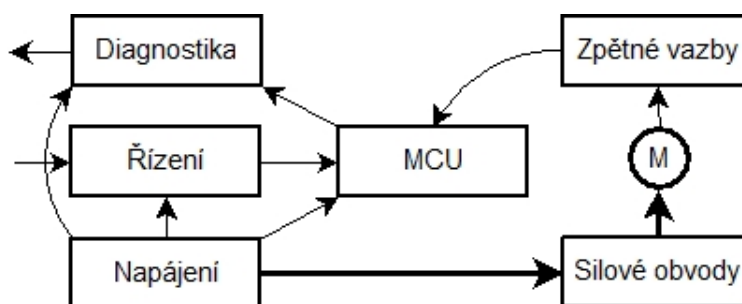
Jelikož implementace PID regulátoru je již poměrně jednoduchou záležitostí a PID regulátor se vždy přizpůsobuje přesně na konkrétní systém, nebude regulace na konstantní otáčky dále řešena v praktické části diplomové práce.

<sup>1</sup>PID regulátor - regulátor s rozdílovou, integrační a derivační složkou používaný pro řízení analogových veličin

## Kapitola 3

# Blokové schéma

Regulátor BLDC motoru musí obsahovat jisté základní prvky pro korektní provoz motoru. V následující kapitole si rozebereme základní blokové schéma regulátoru a popíšeme obecně funkce jednotlivých částí.



Obrázek 3.1: Blokové schéma regulátoru.

### 3.1 Napájení

Regulátor otáček BLDC motoru vyžaduje jako každé jiné elektronické zařízení zdroj, který generuje potřebná napětí pro běh mikrokontroléru a jiných částí regulátoru. Spolehlivost a elektrické parametry zdroje napětí jsou u regulátoru otáček velmi důležité (stejně jako u všech zařízení pracujících s velkými proudy).

Mezi motorem a zdrojem elektrické energie pro pohon motoru probíhají silné elektrické proudy pulzního charakteru se strmými náběžnými hranami, generující silné širokopásmové rušení. Navíc na vstupu regulátoru vzniká nestálé napětí, které kolísá jak do záporného směru při sepnutí motoru (díky úbytku na přívodním vedení), tak stoupá nad úroveň napětí zdroje při dynamickém brzdění a rozpínání proudu do indukční zátěže (motoru).

Vstup regulátoru je nutné filtrovat vysokými kapacitami, které snesou provozní napětí alespoň dvojnásobné hodnoty, než je běžné provozní napětí regulátoru. Vyrovnáváním napěťových špiček se kondenzátory ohřívají a je nezbytné zajistit dostatečný odvod tepla. To se týká všech částí regulátoru kde vzniká teplo, zejména pak silové spínací části. Vstup napájecího zdroje je vhodné chránit proti náhodným vysokým napěťovým špičkám (náhodná nekorektní komutace) varistorem.

V souhrnu je úkolem napájecí sekce generování stabilního napětí 5 V pro napájení elektroniky regulátoru, které i v případě krize (např. selhání napájecího zdroje) musí za-

jistit napájení pro řídicí procesor nejméně po dobu potřebnou pro korektní odpojení silové elektroniky. Dále potřebujeme napětí 10 V pro spínací část regulátoru (bude vysvětleno níže) a kontrolní napětí pro hlídání stavu napájecího zdroje v rozsahu měřitelném A/D převodníkem mikrokontroléru.

## 3.2 Řízení

Abychom mohli využít hlavní funkce regulátoru otáček, musíme mít možnost zadat regulátoru množství výkonu, které chceme do motoru dodat. Regulátor není nijak omezen ve způsobu jakým budeme předávat informaci o námi požadovaném výkonu.

Možnosti komunikace s navrhovaným regulátorem jsou

- datové linky -  $I^2C$  (two wire interface), SPI (serial peripheral interface), UART (universal asynchronous receiver and transmitter)
- digitální - logickou úrovní, šířkou pulzu, kmitočtem impulsů
- analogové - napětím, diferencí napětí.

Sekce řízení se stará zejména o přizpůsobení napěťových úrovní řídicího signálu na signály akceptovatelné mikrokontrolérem a eventuálně podle potřeby obsahuje řadiče složitějších a z pohledu mikrokontrolérů méně běžných rozhraní (Ethernet, RS-485 či USB).

Podle náročnosti zvoleného způsobu komunikace s regulátorem a režie zpracování vstupu se však mění také hranice maximální rychlosti otáčení motoru, se kterou je regulátor schopen pracovat. Nejvhodnější jsou proto způsoby řízení navazující přímo na hardwarové periferie mikrokontroléru, kde jsou informace zpracovávány mimo běh programu a hlavní program si je může ve vhodnou chvíli přebírat.

## 3.3 Diagnostika

Byla by škoda nevyužít možnosti diagnostiky regulátoru otáček nadřazeným systémem tam, kde je to možné či dokonce nutné. Regulátor snímá během provozu motoru velkou škálu údajů, které může nabídnout vhodným rozhraním nadřazenému systému. Funkce obvodů diagnostiky tak souvisí s obvodem řízení a vytváří komplementární informační cestu k cestě řídicího signálu.

Údaje které je schopen regulátor poskytnout jsou:

- rychlost otáčení motoru
- napětí napájecího zdroje
- průměrnou hodnotu proudu odebíraného ze zdroje
- špičkovou hodnotu proudu fází motoru
- teplotu silové části regulátoru.

Detaily o způsobu snímání příslušných veličin a příslušný hardware budou popsány níže. Na rozdíl od řídicí informace mají stavové a běhové informace regulátoru otáček omezené možnosti komunikačního rozhraní a jsou striktně omezeny na hardwarové periferie mikrokontroléru. Hlavní programová smyčka neobsahuje dostatečné množství času pro emulace rozhraní. Odesílání je tedy možné pouze po datových linkách (UART, SPI, TWI), kterými je mikrokontrolér vybaven.

## 3.4 Mikrokontrolér

Řídící mikrokontrolér je nejdůležitější část regulátoru, která ovlivňuje jeho základní parametry. Tím primárním jsou maximální dosažitelné elektrické otáčky. Mikrokontrolér musí dokončit každou komutaci úkony spojené s provozem motoru a každou elektrickou otáčku jisté režijní úkony, bez kterých provoz motoru není možný. Proto vzhledem ke konečnému výkonu použitého mikrokontroléru existuje vždy mez maximálních elektrických otáček motoru za minutu. Jsou ale také další aplikačně závislé parametry, které mohou ovlivnit zásadním způsobem volbu mikrokontroléru.

### 3.4.1 Maximální otáčky

Mez maximálních otáček není vzhledem k mikrokontroléru definitivní, závisí také na zvoleném způsobu řízení a vysílání diagnostických informací. Sofistikovanější způsoby ovládání znamenají obvykle vyšší režii jejich zpracování, a tím také vyšší výpočetní zátěž pro mikrokontrolér.

V úzké závislosti na cílovou aplikaci lze zaujmout kompromisní postoj a vykonávat režijní úkony, jako je snímání řídicí informace či měření a odesílání kontrolních dat s četností úměrnou otáčkám, avšak režie samotného otáčení motorem představuje pevnou hranici.

U jistých specifických aplikací, které nejsou náchylné na mírné kolísání rychlosti otáčení a s dostatečnou mechanickou setrvačností, je možno všechny režijní úkony vykonat při vynechání každé  $n$ -násobné otáčky motoru, kdy motor necháme běžet pouze setrvačností. To je implementačně velmi snadné, pokud to cílová aplikace dovoluje, a pokud jsme nuceni posunout hranici maximálních otáček danou konvenčním přístupem k vykonávání režijních úloh.

### 3.4.2 Komunikační periferie

Různé aplikace mohou vyžadovat různé způsoby komunikace. Přestože lze většinu rozhraní emulovat softwarově při použití obvodů pro přizpůsobení elektrických úrovní, není to v případě regulátoru otáček BLDC motoru možné.

Softwarová emulace i nejjednodušších komunikačních periférií jakými jsou UART či SPI není možné souběžně s provozem BLDC motoru. Proto musíme řídicí mikrokontrolér volit s ohledem na jeho komunikační periferie.

Mimo běžné periferie vyskytující se ve většině běžně prodávaných univerzálních mikrokontrolérů (např. UART a SPI, často i  $I^2C$ ) existují dražší typy přímo podporující sběrnici USB či Ethernet. Mikrokontroléry této kategorie však nevyhovují z hlediska ceny, rozměrů a spotřeby pro účely regulátoru otáček.

Vyžadujeme-li tedy rychlé či netradiční rozhraní, nejčastěji využijeme funkcí převodníků, které s mikrokontrolérem komunikují po běžné UART lince. Příkladem může být převodník FT-232 pro emulaci sériového portu mezi mikrokontrolérem a nadřazeným systémem pomocí rozhraní USB.

### 3.4.3 Přesnost periférií

Pokud v aplikaci vyžadujeme velmi přesné údaje o rychlosti otáčení motoru, napětích či prouděch v systému, musíme se poohlédnout také po vlastnostech mikrokontroléru, jako je šířka slova ALU, přesnost a rychlost A/D převodníků či citlivosti komparátoru.



V této kategorii přestává platit pravidlo, že dražší a výkonnější mikrokontrolér je vhodnější. Výkonné mikrokontroléry (například s jádrem ARM) mají obvykle nižší přesnost A/D převodníků z důvodů vysokého rušení měření od vysokých kmitočtů jádra a předpokládají spíše připojení citlivého a přesného externího A/D převodníku. Komparátorem s přepínatelnými vstupy nutnými pro řízení BLDC motoru pak často nedisponují vůbec.

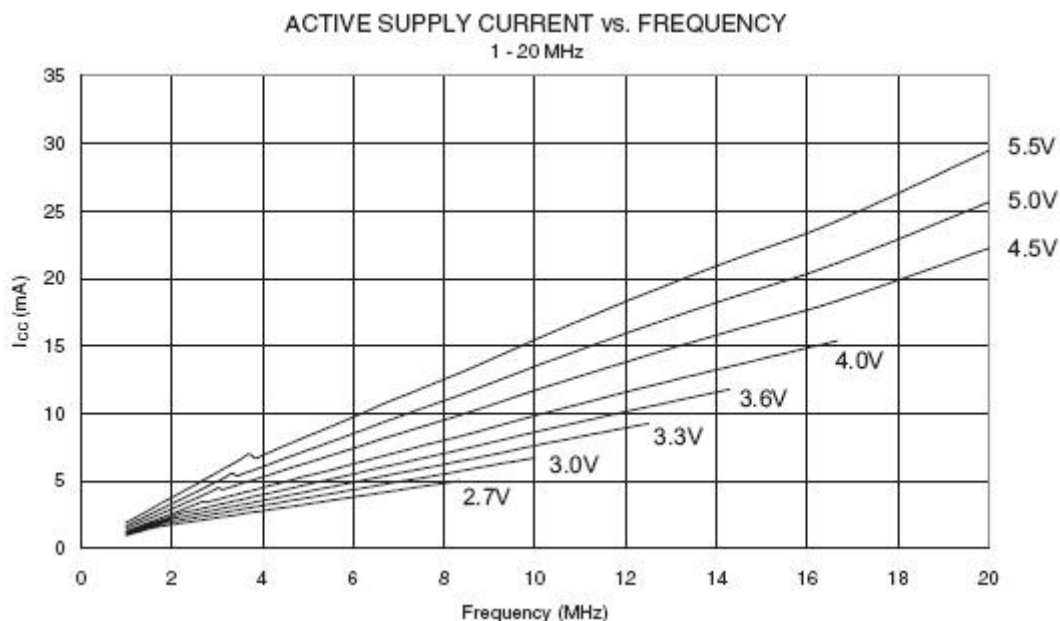
Pro většinu aplikací je dostatečná ALU s 8 bity šířky slova, PWM modulace s přesností 10 bitů a A/D převodník s přesností 8-10 bitů. Tuto podmínku splňuje většina mikrokontrolérů dostupných běžně na trhu. Při výběru mikrokontroléru bude brán v ohled spíše na přítomnost potřebných periférií, cenu a subjektivní zkušenosti.

### 3.4.4 Elektrické a mechanické parametry

Pokud je regulátor otáček a BLDC motor součástí velkého průmyslového soustrojí, nehraje otázka mechanických a elektrických parametrů, až na spolehlivost a odolnost, velkou roli. Situace se komplikuje, pokud je nutné zabudovat regulátor do kompaktního či mobilního zařízení s bateriovým napájením.

Zejména zde se pak projeví zbytečné předimenzování výkonu a schopností mikrokontroléru pro regulátor otáček. Výkonnější typy mikrokontrolérů mívají markantně vyšší spotřebu (úměrnou jejich taktovacímu kmitočtu a počtu periférií), dále rozměrově větší pouzdro a mohou mít nevhodné pouzdro pro montáž do mechanicky namáhaných systémů (ZIF patice).

Příkladem může být graf spotřeby mikrokontroléru firmy Atmel ATmega16. Graf zobrazuje odebíraný proud v závislosti na napájecím napětí a taktovacím kmitočtu (3.2). Z grafu je zřejmé že pro plný výkon 20 MIPS má mikrokontrolér spotřebu 25 mA, oproti tomu lépe perifériemi vybavený mikrokontrolér dsPIC70178 má pro stejný výkon spotřebu 150 mA.



Obrázek 3.2: Spotřeba mikrokontroléru ATmega16 [2]

Při výběru mikrokontroléru bude brán ohled na pouzdro mikrokontroléru, respektive jeho možnost výměny bez použití speciálního vybavení. V úvahu tak připadají pouzdra

typu TQFP a podobné.

### 3.5 Silové obvody

Silové obvody zajišťují spínání napájecího napětí zdroje na jednotlivé fáze motoru. Třífázový regulátor vyžaduje 6 spínacích prvků pro řízení napájení třífázového motoru. Na každou fázi je tedy možné připojit kladný, nebo záporný pól zdroje.

Jelikož je spínáno stejnosměrné napětí, je možno použít dva typy spínacích prvků - unipolární nebo bipolární tranzistory. Elektromechanické spínače typu relé či stykač zde není možno použít, spínací kmitočty v řádu jednotek kHz nelze spínat mechanickou cestou.

Pro spínání nízkého stejnosměrného napětí o vysokých proudech se dnes využívají téměř výhradně unipolární tranzistory. Unipolární tranzistory vyžadují přídavnou elektroniku pro jejich plné a korektní sepnutí, avšak výhody použití unipolárních tranzistorů jednoznačně převažují. Elektronika pro jejich spínání zároveň zajišťuje nemožnost sepnutí kladného i záporného napětí ve stejné fázi. Tato situace může vlivem poruchy nastat a došlo by k úplnému zničení regulátoru i zdroje napětí přímým zkratem.

Detailní informace o řízení unipolárních tranzistorů budou zmíněny v sekci hardwaru.

### 3.6 Zpětné vazby

Hlavním úkolem obvodu pro snímání zpětných vazeb je přizpůsobení fázových napětí na svorkách motoru a elektrické odvození středního bodu vinutí.

Při provozu BLDC motoru pomocí snímání BEMF napětí porovnáváme napětí středního bodu vinutí motoru s napětím fáze, která v daném okamžiku není pod napětím zdroje.

Fázové napětí je přivedené fázovým vodičem do regulátoru otáček a je tedy známé. Toto napětí však musíme přizpůsobit parametrům komparátoru mikrokontroléru, nejčastěji odporovým děličem snížíme jeho hodnotu na mez přijatelnou pro komparátor. Při volbě potřebného dělicího poměru musíme brát ohled nikoliv na napájecí napětí zdroje, ale na maximální napětí, které se může na fázovém vodiči vyskytnout a může být mnohem vyšší než napětí provozní. Dělicí poměr nesmí být příliš vysoký, nemuseli bychom pak korektně detekovat nízké napětí při rozběhu motoru, a tím zcela znemožnili start BLDC motoru.

Zásadnějším problémem je vytvoření umělého středního bodu vinutí motoru, který je nezbytný pro korektní měření BEMF napětí metodou komparace. Pokud bychom byli schopni měřit fázová napětí dostatečně rychle, lze střední bod spočítat matematicky, avšak běžné mikrokontroléry nemají dostatečně výkonné A/D převodníky. Musíme tak vytvořit střední bod pomocí hardwaru regulátoru. Přesný popis jak toho dosáhnout bude uveden v sekci hardwaru.

### 3.7 Shrnutí

Ze závěrů teoretické části byla stanovena základní struktura regulátoru otáček BLDC motoru a způsob realizace hardwaru regulátoru.

Bude nutné navrhnout spolehlivý zdroj napájecího napětí (vyhovující provozu v silno-proudém zařízení), vhodný mikrokontrolér pro řízení regulátoru, třífázovou spínací část a hardwaru pro odvození napětí středního bodu vinutí BLDC motoru.

## Kapitola 4

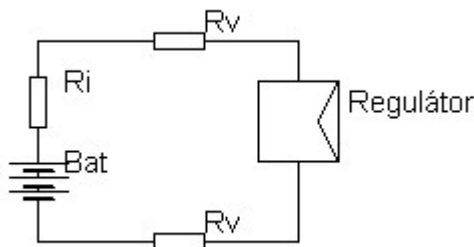
# Hardware

Kapitola obsahuje detaily praktické realizace hardwaru regulátoru otáček BLDC motoru, detailní řešení problémů elektronické části regulátoru a volbu konkrétních běžně dostupných součástek pro kompletaci regulátoru.

### 4.1 Napájecí obvody

Pro napájení obvodů regulátoru jsou nutná dvě napětí, 5 V a 10 V, na která jsou kladeny nemalé nároky z hlediska stability a doběhu v případě výpadku napájecího napětí.

Při napájecím napětí regulátoru 8-24 V může napětí na vstupu regulátoru kolísat v rozmezí téměř 5-30 V při běžném provozu. Běžným provozem zde míním situaci, kdy je vše v pořádku a BLDC motor se bezproblémově točí. Kolísání napětí je způsobeno zejména pulzním charakterem odběru elektrického proudu ze zdroje napětí s nenulovým vnitřním odporem zdroje ( $R_i$ ) a vodičů vedení ( $R_v$ ) [4.1](#).



Obrázek 4.1: Náhradní schéma napájení regulátoru.

Na vstupu zdroje regulátoru tedy musíme nezbytně řešit dva protichůdné problémy, kterými jsou podpětí a přepětí během provozu regulátoru. Oba tyto problémy jsou snadno řešitelné. Aby nedocházelo k podpětí na straně vstupu regulátoru, je nutné zablokovat vstup dostatečně velkými kapacitami, které zaručí že ani při vysokém proudovém odběru neklesne vstupní napětí pod mez funkce regulátoru a naopak generované energetické špičky od motoru budou pohlceny, aniž by došlo ke znatelnému nárůstu napětí. Kondenzátory je nutno dostatečně dimenzovat na 1,5 až 2-násobek provozního napětí.

Aby vstupní napětí nestoupalo příliš vysoko během krizových stavů, osadíme navíc vstup regulátoru varistorem o hodnotě jen o málo nižší, než je maximální vstupní napětí

následného stabilizátoru napětí 5 V. Přestože se varistor při prudkém nárůstu napětí zničí, zabrání svým průrazem nárůstu napájecího napětí nad akceptovatelnou mez a svede energii mimo elektroniku regulátoru. K obnově funkce postačí vyměnit poškozený varistor.

Problém nastává při zabrzdění motoru do zdroje, který nedokáže energii dodanou motorem pojmout (síťové zdroje). Dojde sice k průrazu varistoru a svedení části energie mimo regulátor, avšak množství energie přeměněné na teplo je natolik velké, že dojde k mechanickému porušení varistoru, který často odstřelí z desky plošného spoje a přestane tak plnit svou funkci. Tento problém se nedá řešit jinak, než důsledným deaktivováním funkce brzdy při napájení ze síťového zdroje.

Požadavek na udržení napájecího napětí na vstupu regulátoru na úrovni dostatečné po dobu nezbytně nutnou ke korektnímu odpojení silové části regulátoru zajišťují již výše zmíněné kondenzátory na obou stranách stabilizačního obvodu 5 V.

Stabilizaci napětí na 5 V je možné provádět dvěma způsoby. První možností je standardní lineární stabilizátor, který přebytečnou energii při snižování napětí přemění na teplo a nebo spínaný stabilizátor, který je sice složitější a nákladnější, ale odpadají ztráty a problémy spojené s generováním a odvětráváním tepla.

Celá elektronická řídicí část regulátoru má odběr nepřevyšující 50 mA. Pokud budeme uvažovat maximální dovolené napájecí napětí regulátoru 24 V, pak dle vzorce dostáváme množství generovaného tepla standardním lineárním stabilizátorem.

$$P_{tot} = (U_{in} - U_{out}) * I = (24 - 5) * 0,050 = 0,95W$$

Z aktivní součástky stabilizátoru tedy musíme odchladit v nejhorším možném případě asi 1 W tepla. To je poměrně nízká hodnota a není proto důvod použít nákladnější spínaný regulátor.

Pro zdroj 5 V je tedy nutné vyřešit poslední zbývajících problém, kterým je volba zapojení stabilizátoru 5 V. Je možné využít monolitické integrované stabilizátory typu 7805 či LE50, nebo sestavit obvod z diskretních součástek s referencí vytvořenou pomocí Zenerovy diody a tranzistoru jako aktivního řídicího prvku.

Výhodnější je jednoznačně využít monolitický integrovaný stabilizátor. Stabilizátory drží výstupní napětí velmi přesně bez ohledu na vnější teplotu a obsahují bezpečnostní prvky (přetížení, přehřátí apod.). Problémem je, že low-drop<sup>1</sup> stabilizátory v SMD pouzdru nejsou schopny vyžárit do prostoru tepelný výkon 1 W.

Řešením je tedy kompromisní zapojení. Pro předběžné snížení napětí na cca 8 V bude použit obvod se Zenerovou diodou a tranzistorem, který převezme téměř veškerý provozní úbytek napětí a tím i tepelnou ztrátu na své pouzdro, které není žádný problém dostatečně chladit. Pro stabilizátor LE50 pak zbývá jen malá tepelná ztráta, která se bez obtíží odchladí přirozeným prouděním. Výsledné zapojení zdroje napětí 5 V je pak na následujícím schématu 4.2.

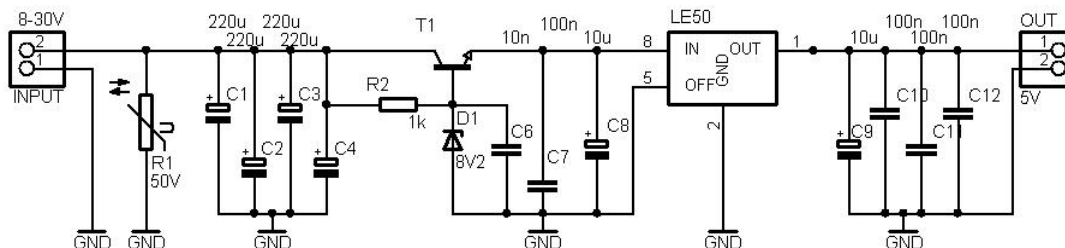
Je tedy vyřešeno 5 V napájení řídicí elektroniky regulátoru. Dále je nutno generovat 10-12 V pro spínací silové obvody. Toto vyšší napětí je nutné pro korektní sepnutí N-MOSFET tranzistorů silové části regulátoru, detaily budou popsány později v sekci silové elektroniky.

Generování 10 V napětí není tak snadné, jako je tomu v případě 5 V pro řídicí elektroniku. Minimální napájecí napětí regulátoru je 8 V a dokonce může během provozu klesat i níže než je tato hodnota. Zde je nutno podotknout, že toto napětí nesmí klesnout pod hodnotu 10 V, pokles by měl fatální následky pro silovou elektroniku regulátoru (bude popsáno dále).

Stojíme tedy před problémem jak generovat 10 V z napětí, které může být vyšší i nižší

---

<sup>1</sup>Stabilizátory s nízkým úbytkem napětí.

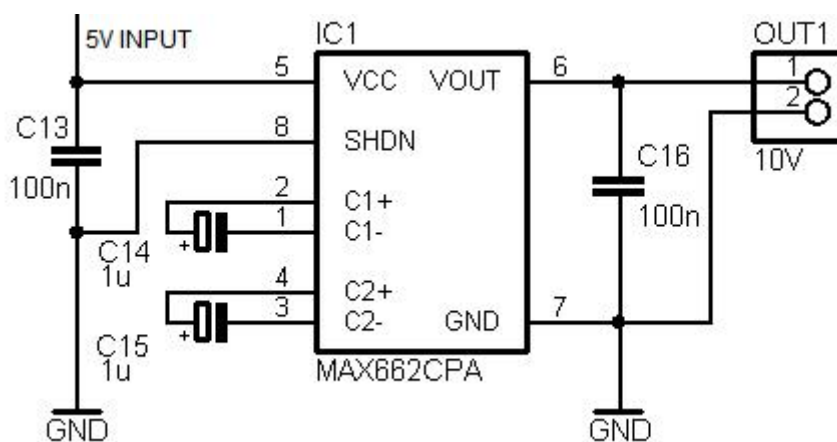


Obrázek 4.2: Napájecí zdroj 5 V.

než požadované výstupní napětí. Existují spínané zdroje schopné transformace napětí jak nahoru, tak dolů, ale nikdy ne oběma směry, tedy alespoň ne s dostatečně dynamickými změnami směru. Spínaný zdroj je navíc zařízení, které ke své činnosti vyžaduje cívku měniče, a zvyšuje tak rozměry i cenu výsledného zařízení.

Elegantní řešení nabízí nábojová pumpa s kondenzátory. Ze zdroje napájecího napětí pro řídicí elektroniku máme k dispozici stabilní napětí o velikosti 5 V po celou dobu provozu regulátoru. Nábojová pumpa dokáže zdvojit toto napětí pokud není výstupní odběr proudu příliš vysoký nabíjením a dynamickým přepojováním kondenzátorů z paralelního do sériového zapojení. Dodává tedy ze vstupního napětí 5 V cca 10 V na výstupu, byť s malou proudovou zatížitelností.

Protože ale používáme 10 V napětí pouze pro nabíjení bran (gate) MOSFET tranzistorů (pouze kapacitní charakter), nebrání nic využití nábojové pumpy jako zdvojovače napětí. Výsledné zapojení zdvojovače napětí je na schématu 4.3



Obrázek 4.3: Napájecí zdroj 10 V.

Na první pohled ne příliš efektivní postupnou transformací vstupního napětí na 8 V, 5 V a následně zpět na 10 V docílíme zásadního zvýšení spolehlivosti a odolnosti napájecího zdroje, která je u mikroprocesorem řízeného silového zařízení nezbytná. Zdroj v tomto zapojení vyhovuje veškerým požadavkům na něj kladeným.

V případě výpadku napájení regulátoru během provozu BLDC motoru obsahuje navržený zdroj dostatečné množství akumulovaného náboje v kondenzátorech, aby nedošlo k příliš strmému sestupu napájecího napětí řídicí části a nekorektnímu odpojení silové části regulátoru.

## 4.2 Mikrokontrolér

Napájení řídicích a silových obvodů je vyřešeno, a nyní přejdeme k volbě nejdůležitější části regulátoru, řídicího mikrokontroléru. řídicí mikrokontrolér ovlivňuje zásadní parametry regulátoru, kterými jsou maximální provozní otáčky, komunikační rozhraní a výkonová rezerva pro složitější aplikačně závislé řízení.

Jako referenční dokumenty pro výběr možných mikrokontrolérů byly použity internetové obchody firem GM Electronic [7] a GES Electronics [8]. Z nabídky těchto firem bylo vybráno několik možných kandidátů na řídicí mikrokontrolér regulátoru otáček.

Omezení pro první výběr kandidátů bylo v ceně a dostupných pouzdrech. Cenová hranice byla stanovena na 100,-Kč/ks maloobchodní ceny a pouzdro DIL či TQFP (ručně zapájitelné do DPS). Prvním kolem výběru prošli následující kandidáti.

- ATMEL, mikrokontroléry řady 8051 (AT89C2051)
- ATMEL, mikrokontroléry řady ATTiny (ATTiny2313)
- ATMEL, mikrokontroléry řady ATmega (ATmega8)
- Freescale, mikrokontroléry s jádrem Nitron (MC68HC908QY4)
- Microchip, mikrokontroléry řady PIC12x, PIC16x.

Nyní rozeberu jednotlivé mikrokontroléry ze všech hledisek, které se týkají regulátoru otáček pro BLDC motor. Informace jsem čerpal z oficiálních datasheetů výrobců mikrokontrolérů, jejich detailní seznam je uveden v odkazech na literaturu.

### 4.2.1 ATMEL 89C2051

Mikrokontrolér ATMEL 89C2051 [1] [9] je zřejmě nejoblíbenější mikrokontrolér pro amatérské aplikace. Patří do rodiny mikrokontrolérů standardu MCS-51, což je průmyslový standard procesorů navazujících na legendární procesor I8051. Mikrokontrolér ATMEL 89C2051 je plně instrukčně kompatibilní s původním I8051.

Základní charakteristika mikrokontroléru AT89C2051:

- Výkon – taktovací kmitočet 0-24 MHz, 2 MIPS, 8bitová ALU
- 2 kB PEROM, 128 B RAM
- napájení 2,7-6 V, 15 I/O linek
- 6 přerušovacích úrovní, 2x16bitový čítač
- UART, analogový komparátor

Mikrokontrolér 89C2051 je osmibitový mikrokontrolér s velmi příjemnou instrukční sadou, určený pro programování přímo v jazyce assembler. Při taktování 20 MHz má výkon přibližně 2 MIPS. Hlavní výhodou AT89C2051 je jeho jednoduchost a možnost velmi rychlého zvládnutí programátorem.

Vzhledem k použití v regulátoru otáček BLDC motoru nemá mikrokontrolér 89C2051 žádný funkční nedostatek, který by znemožnil jeho využití v regulátoru, avšak hned několik významných nevýhod.

AT89C2051 má nízký výpočetní výkon jádra. Mikrokontrolér je schopen dokončit při vysokém taktovacím kmitočtu 20 MHz přibližně 2 miliony instrukcí za sekundu. To je vůči ostatním mikrokontrolérům ve zvolené kategorii velmi málo a zásadním způsobem bychom degradovali hranici maximálních otáček regulátoru.

Na hranici využitelnosti je také množství programovatelné paměti (2 kB). Přestože bude regulátor napsán v jazyce assembler, 2 kB je dostatečné pouze pro základní funkce regulátoru, jeho následná rozšiřitelnost by byla velmi problematická.

Velmi vážným nedostatkem je pak nemožnost programování mikrokontroléru metodou ISP<sup>2</sup>. Vývoj zařízení není téměř možný bez osazení regulátoru i programátoru ZIF patičkami, nutností procesor neustále odpojovat od zařízení regulátoru a připojovat k programátoru. Významně se tak komplikuje ladění kódu aplikace.

15 I/O linek je dostatečných, pro minimální konfiguraci regulátoru potřebujeme 11 I/O linek. Použití mikrokontroléru AT89C2051 by však vyžadovalo připojení externího analogového multiplexeru typu 4051 pro přepínání analogového fázového signálu ze tří fází na jediný vstup komparátoru mikrokontroléru.

AT89C2051 nemá možnost generovat PWM řídicí signál pomocí hardwarové periferie. Jelikož dva vestavěné časovače mají pouze jediný přerušovací signál při jejich přetečení, bylo by je nutné pro softwarové generování PWM signálu využít oba, nebo při použití pouze jednoho dynamicky vypočítávat a přenastavovat jeho hodnotu. Další režie při výkonu pouhých 2 MIPS není příliš žádoucí.

Nepraktická je také nepřítomnost A/D převodníků pro získávání stavových parametrů regulátoru, absence brown-out detektoru<sup>3</sup> pro případ selhání napájecího zdroje, neschopnost uvést I/O linky do stavu vysoké impedance a absence perzistentní paměti EEPROM pro uložení uživatelského nastavení regulátoru.

Všechny uvedené nevýhody jednoznačně vyřazují mikrokontrolér AT89C2051 z použití v regulátoru otáček. Mikrokontrolér AT89C2051 je dostupná, levná a snadno uživatelsky zvládnutelná varianta pro náhradu složitějších logických obvodů, avšak na aplikaci regulátoru otáček BLDC motoru výkonově nedostačuje.

#### 4.2.2 ATTiny2313

Lépe než mikroprocesor 89C2051 jsou vybaveny mikrokontroléry řady ATTiny [4]. ATTiny je nová série mikroprocesorů mimo standard MCS-51. ATTiny má 120 instrukcí s charakteristikou RISC, přičemž většina instrukcí je dokončena v jednom taktu systémových hodin. Mikrokontrolér má tedy až 10-ti násobnou výkonnost při shodném kmitočtu než mikrokontrolér AT89C2051.

Základní charakteristika mikrokontrolérů ATTiny

- 120 RISC instrukcí, 0-20 MHz, 20 MIPS, 8bitová ALU
- 2 kB PEROM, 128 B RAM, 128 B EEPROM
- napájení 2,7-6 V, 18 I/O linek
- 6 přerušovacích úrovní, 1x8bitový čítač, 1x16bitový čítač s podporou PWM
- UART, SPI, analogový komparátor, podpora ISP, Brown-out detektor

---

<sup>2</sup>ISP = in system programming, programování v zařízení

<sup>3</sup>Brown-out - obvod pro detekci selhání napájecího napětí a korektní reset mikrokontroléru

Jádro mikrokontrolérů ATTiny používá osmibitovou aritmetiku. Instrukční dekodér implementuje 120 instrukcí typu RISC, dokončovaných v jednom taktu hodin. To v praxi znamená výkonnost téměř 1 MIPS na každý 1 MHz. Při 8-16 MHz taktovacího kmitočtu dosahujeme výkonnosti 8-16 MIPS, což nám dovoluje dosáhnout elektrické otáčky motoru v řádu stovek tisíc. To je hodnota dostatečná i pro mnohopólové motory s vysokým poměrem elektrických otáček ku mechanickým.

Z hlediska prostoru paměti máme k dispozici opět pouze 2kB PEROM paměti pro kód. Situace je zde horší než v případě mikrokontroléru AT89C2051, kde je k dispozici stejné množství paměti pro uživatelský program. Mikrokontrolér AT89C2051 má bohatší instrukční repertoár na složitější instrukce a tedy funkčně shodný program pro mikrokontrolér AT89C2051 bude zabírat méně místa v paměti programu, než pro mikrokontrolér ATTiny.

ATTiny lze bez obtíží programovat pomocí rozhraní SPI přímo v cílovém zařízení (ISP). Tato vlastnost významným způsobem zjednodušuje a zrychluje celý cyklus implementace firmwaru pro vestavěný systém. U zařízení, ve kterém nejsou použity veškeré dostupné I/O linky, můžeme využít také tzv. DebugWire. Jde o jednovodičové ladící rozhraní pro levné mikrokontroléry s malým počtem vývodů, které umožňuje monitorovat běh aplikace přímo ve vestavěném systému. Omezení tkví pouze v nízké rychlosti tohoto rozhraní, a pro potřeby ladění regulátoru otáček BLDC motoru nepředstavuje žádný další přínos.

Ve shodě s mikrokontrolérem AT89C2051 mají mikrokontroléry ATTiny dostatečný počet I/O linek pro minimální konfiguraci regulátoru. ATTiny má shodně jeden komparátor vyžadující připojení externího analogového multiplexeru typu 4051 pro přepínání analogového fázového signálu ze tří fází na jediný komparátor.

Mikrokontroléry ATTiny jsou již lépe připraveny pro řízení výkonu do zátěže a mimo jednoduchého osmibitového časovače pro obecné použití mají plně vybavený 16bitový časovač pro generování PWM. ATTiny je schopen generovat jak rychlou, tak i fázově a kmitočtově korektní PWM až do přesnosti 10 bitů. Maximální kmitočet závisí na hodinovém signálu. Pokud nedokážeme využít plně hardwarově implementovanou PWM na jednom výstupním kanálu, ale vyžadujeme dynamické generování na obecně různých I/O linkách, má ATTiny připraveny přerušovací kanály pro aktivaci a deaktivaci PWM pulzu, a ani softwarově generovaná PWM pak nepředstavuje pro hlavní program vysokou režii.

ATTiny není pro svou jednoduchost vybaven A/D převodníky, a počet volných I/O linek neskýtá možnost připojit externí převodník. Oproti tomu ATTiny obsahuje pro regulátor otáček potřebný brown-out detektor a je schopen v situaci selhání zdroje uvést své I/O linky do bezpečného stavu vysoké impedance.

Pro uživatelské nastavení máme k dispozici EEPROM o velikosti 128 B, s možností přístupu po jednotlivých bajtech. Množství 128 B je pro aplikaci regulátoru dostatečné.

Spotřeba mikrokontroléru ATTiny je velmi nízká, přibližně 0,7 mA na 1 MHz hodinového kmitočtu a je nejnižší z vybraných mikrokontrolérů.

ATTiny je mikrokontrolér s RISC instrukčním souborem a výkonem až 20 MIPS. Řada ATTiny je orientována na velmi nízkou cenu a pro použití v regulátoru otáček BLDC motoru je nedostatečná zejména paměť pro uživatelský program a také absence A/D převodníku. Pro jednodušší aplikace, které kladou velký důraz na cenu a spotřebu výsledného zařízení nabízí mikrokontrolér ATTiny mnohé pokročilé funkce oproti AT89C2051. Jde zejména o možnost ISP programování, ladění pomocí DebugWire, schopnost přeprogramovat sebe sama za běhu pomocí bootladeru, PWM regulaci výkonu a SPI rozhraní. ATTiny je výborný mikrokontrolér pro levné bateriově napájené zařízení s nepříliš rozsáhlým programem.



### 4.2.3 ATmega8

Řada mikrokontrolérů ATmega [3] je nejvyšší řadou univerzálních 8bitových mikrokontrolérů firmy Atmel AVR [10]. ATmega přidává ke standardnímu instrukčnímu souboru mikrokontrolérů ATtiny dalších 10 instrukcí pro práci s rozšířeným paměťovým prostorem. Jádro mikrokontroléru ATmega je shodné s mikrokontroléry ATtiny, mikrokontroléry ATmega se liší pouze vyšší vybaveností z hlediska paměti a připojených periférií.

Základní charakteristika mikrokontrolérů ATtiny:

- 130 RISC instrukcí, taktovací kmitočet 0-20 MHz, 20 MIPS, 8bitová ALU
- 8 kB PEROM, 1 kB RAM, 512 B EEPROM
- napájení 2,7-5,5 V, 23 I/O linek
- 2x8bitové, 1x16bitový čítač, dva s podporou pro generování PWM
- 8 kanálový A/D převodník, UART, SPI, TWI, analogový komparátor
- podpora ISP, Brown-out detektor.

Mikrokontrolér ATmega8 udržuje trend nízkonákladových mikrokontrolérů v přechodu od komplexních instrukčních sad CISC s několika cykly hodinového signálu na instrukci k jednoduchým instrukcím RISC s vykonáváním během jediného taktu hodinového signálu. To umožňuje efektivní vykonávání programů psaných ve vyšších jazycích, a série ATmega dovoluje efektivní přechod na programy psané v jazyce C.

Bohužel v případě regulátoru otáček BLDC motoru nelze vyššího jazyka použít. PWM impulzy je nutno distribuovat mimo čistě hardwarové linky časovačů a PWM je nutno generovat s pomocí přerušení a krátkých bloků kódu. Jazyk C při volání obslužných rutin aktivně využívá zásobníku pro uložení části registrů a stavových informací, aniž by to bylo nezbytně nutné. Tato režie je v případě obsluhy generování PWM vyšší, než je samotný aktivní kód, a právě díky této vlastnosti ztrácíme znatelnou část výkonu. Zásadní výhodu oproti předchozím dvěma typům mikrokontrolérů, podporu programů psaných v jazyce C, u ATmegy nedokážeme využít.

ATmega má 19-ti kanálový přerušovací systém, vhodný pro implementaci zařízení běžících v reálném čase. Můžeme tak provádět kritické úlohy mimo běh hlavního programu a implementace zařízení typu regulátoru otáček je s využitím těchto přerušení jednodušší. Za účely aktualizace systému u zákazníka lze tabulku přerušovacích vektorů dynamicky přepínat mezi hlavní programovou sekci a sekci bootloaderu.

Sekce bootloaderu je část paměti na konci adresového prostoru, ve které je povoleno vykonávání instrukce zápisu do programové paměti. Pro bootloader lze vyhradit 128 - 1024 instrukčních slov, což je 256-2048 B kódu. Množství rezervované paměti je již dostatečné pro implementaci složitějších algoritmů, například dekódovacích, a realizovat tak přenos firmware po nechráněném médiu (Internetu). Funkci bootloaderu podporoval už mikrokontrolér ATtiny, avšak teprve řada ATmega má dostatečné množství paměti pro reálné využití bootloaderu. Pro praktické aplikace má možnost aktualizace u koncového zákazníka velký význam.

Pro kód máme k dispozici 8 kB programové paměti, která je sdílená jak hlavním programem, tak případným zavaděčem v sektoru bootloaderu. Pro běh programu je k dispozici 1 kB paměti RAM a 512 B EEPROM pro uložení persistentních uživatelských dat. Programovou paměť můžeme nahrávat pomocí ISP přes SPI rozhraní přímo v cílovém zařízení, případně vytvořit vlastní systém pro nahrávání kódu s pomocí bootloaderu.

Za účelem ladění kódu jsou mikrokontroléry ATmega vybaveny rozhraním DebugWire u ATmega8 a nižších či plnohodnotného standardizovaného rozhraní JTAG u vyšších typů.

Mikrokontrolér ATmega8 je vybaven všemi periferiemi, které vyžadujeme pro provoz regulátoru otáček BLDC motoru.

Pro snímání zpětných vazeb motoru je mikrokontrolér ATmega vybaven sice pouze jedním analogovým komparátorem, avšak možnost připojení několika různých signálů je realizována pomocí multiplexeru. Port C mikrokontroléru je možné využít pro připojení až 8 analogových signálů. Signály jsou přivedeny na vstupy multiplexeru, kterým můžeme programově volit aktivní vstup. Výstup multiplexeru je sdílen periferií A/D převodníku a komparátoru. Nelze tedy zároveň využívat obě tyto periferie, ale je nutné mezi nimi přepínat.

Komparátor mikrokontroléru ATmega8 má pevně vyvedený neinvertující vstup a invertující vstup s možností pevného nastavení nebo spojení s multiplexerem A/D převodníku. Pokud zvolíme pro invertující vstup multiplexer A/D převodníku, nelze využívat A/D převodník a obvod komparátoru zároveň.

A/D převodník je 10bitový, s absolutní přesností  $\pm 2$  LSB. Maximální rychlost pro převod v plném rozlišení je 15 kSpS<sup>4</sup>. Rychlost A/D převodníků není dostatečná pro snímání zpětných vazeb, avšak plně vyhovuje pro snímání provozních údajů regulátoru, jakými jsou napájecí napětí, odebíraný proud z baterií a teplota regulátoru. Obvod A/D převodníku snese na svých vstupech napětí až do úrovně napětí napájecího, s možností externí reference, či interní s hodnotou 2,56 V.

Shodně s mikrokontrolérem ATtiny2313 je ATmega8 vybaven 16bitovým časovačem s generováním rychlého, fázově korektního a frekvenčně korektního PWM signálu s rozlišením až 10 bitů. Časovač je vytvořen s ohledem na hardwarové i softwarové generování PWM signálu a je připojen na několik kanálů přerušovacího systému. Schopnost generování PWM signálu s nižším rozlišením má i přídavný osmibitový čítač, kterým je mikrokontrolér vybaven navíc oproti mikrokontroléru ATtiny2313.

Spotřeba mikrokontroléru ATmega8 stoupla oproti mikrokontroléru ATtiny z 0,7 mA na 1 MHz na 1,4 mA na 1 MHz. Zvýšená spotřeba jde na vrub většímu množství periferií, zejména A/D převodníku a dále operací s větším množstvím paměti. I přes 100% nárůst spotřeby elektrické energie je spotřeba mikrokontroléru ATmega8 vynikající. Procesory firmy ATMEL se obecně vyznačují nízkou spotřebou elektrické energie, širokými možnostmi jejího dalšího snižování dynamickým vypínáním periferií a režimy spánku mikrokontroléru.

ATmega8 je univerzální široce použitelný mikrokontrolér s řadou pokročilých funkcí, umožňující jeho použití všude tam, kde 8bitové mikrokontroléry dostačují svým výpočetním výkonem. ATmega8 je prvním z uvažovaných mikrokontrolérů, který vyhovuje všemi parametry pro využití v navrhovaném regulátoru otáček BLDC motorů metodou zpětných vazeb.

#### 4.2.4 MC68HC908QY4

Mikrokontrolér firmy Freescale MC68HC908QY4 [14] je jeden z nejlevnějších členů rodiny mikrokontrolérů vystavěných na jádru Nitron. MC68HC908QY4 je osmibitový mikrokontrolér s komplexní instrukční sadou CISC a je dopředně kompatibilní s celou rodinou M68HC05.

Základní charakteristika mikrokontrolérů MC68HC908QY4:

<sup>4</sup>SpS - samples per seconds, počet převedených hodnot za vteřinu

- instrukční sada CISC, taktovací kmitočet 8 MHz, 8bitová ALU
- 4 kB PEROM, 128 B RAM
- napájení 3-5 V, 13 I/O linek
- 1x16bitový čítač, s podporou pro generování PWM
- 4 kanálový A/D převodník
- podpora ISP, Brown-out detektor (LVI - low voltage inhibit)

Mikrokontrolér MC68HC908QY4 patří mezi mikrokontroléry s CISC instrukční sadou, avšak přizpůsobenou pro efektivní vykonávání kódu v jazyce C. Mikrokontroléry jádra Nitron tak představují zajímavou alternativu k mikrokontrolérům s rychlou instrukční sadou RISC. Optimalizovaná CISC sada neznamena zpomalení překládaného kódu z jazyka C, a zároveň poskytuje vyšší komfort při programování mikrokontroléru v assembleru než instrukční sady RISC.

MC68HC908QY4 má 4 kB paměti pro program. Na první pohled je to pouze poloviční množství oproti mikrokontroléru ATmega8, avšak přínos CISC instrukční sady dokáže kompenzovat tento rozdíl. Několik instrukcí instrukčního souboru ATmega8 může být zapsáno jedinou instrukcí mikrokontroléru MC68HC908QY4. Vážnějším nedostatkem je však pouhých 128B RAM pro ukládání běhových informací a absence paměti EEPROM.

Mikrokontrolér MC68HC908QY4 implementuje ladící a ISP rozhraní do jediného jednodrátového rozhraní s obslužným programem v paměti ROM, tzv. monitor. Komunikace s monitorem je možná standardním sériovým portem osobního počítače po přizpůsobení úrovní (MAX232) a sloučením linky TxD a RxD pomocí dvou hradel budiče sběrnice s otevřeným kolektorem. Monitor se aktivuje vysokým napětím (10 V) na resetovacím vývodu MC68HC908QY4.

Použití mikrokontroléru MC68HC908QY4 pro regulátor otáček BLDC motoru je však nemožné hned několika jeho nedostatky.

Mikrokontrolér MC68HC908QY4 nedisponuje žádným komparátorem, který bychom mohli využít pro porovnávání fázového napětí, bylo by tedy nutné připojit komparátory externí.

Pro generování PWM signálu je mikrokontrolér vybaven pouze jediným časovačem, který navíc dokáže generovat PWM signál pouze na jediném vývodu. Časovač nemá dostatek kanálů přerušení pro bezproblémové softwarové generování PWM. Pokud využijeme jediný časovač pro generování PWM, nezbyvá již žádný další volný pro účely časování dalších úloh regulátoru otáček.

A/D převodník má dostatečné 8-bitové rozlišení, avšak A/D převodník ATmega8 má lepší parametry. MC68HC908QY4 nemá *žádné* další periferie pro jakoukoliv komunikaci mezi jednotlivými mikrokontroléry, nebo komunikaci s nadřazeným systémem. To velmi komplikuje jeho další použití.

Mikrokontrolér MC68HC908QY4 je velmi vhodný jako náhrada analogových řídicích obvodů stejně tak, jako je AT89C2051 vhodná náhrada složitějších číslicových obvodů. MC68HC908QY4 je v pouzdře s relativně malým počtem vývodů vybaven vícekanálovým A/D převodníkem, a časovačem s možností PWM regulace, což tento obvod předurčuje pro konstrukci samostatných kompaktních regulačních jednotek jako jsou termostaty, PID regulátory pro jednoduché stejnosměrné pohony a všude tam, kde potřebujeme ovládat dodávaný výkon nebo digitální výstup v závislosti na více analogových veličinách. Pro potřeby regulátoru otáček BLDC motoru nevyhovuje.

#### 4.2.5 PIC

Mikrokontroléry PIC [17] jsou typově nejrozšířenější mikrokontroléry na našem trhu s vůbec největší škálou typů, navzájem jsou jen velmi málo odlišné. Jako referenční typ pro výběr byl zvolen vyšší typ na výkonové škále pod hranicí 100,- Kč - PIC16F872.

Základní charakteristika mikrokontrolérů PIC16F872:

- instrukční sada RISC, 35 instrukcí, taktovací kmitočet 20 MHz, výkon 5 MIPS, 8bitová ALU
- 2k x 14b PEROM, 128 B RAM, 64 B EEPROM
- napájení 2,0-5,5 V, 24 I/O linek
- 2x8bitový, 1x16bitový čítač, s podporou PWM
- 5kanálový A/D převodník
- SPI, TWI
- podpora ISP, Brown-out detektor (LVI).

Mikrokontrolér PIC16F872 má velmi malou instrukční sadu, pouhých 35 instrukcí. Řada mikrokontrolérů PIC12x a PIC16x jsou velmi jednoduché mikrokontroléry, které nejsou vhodné pro komplexnější systémy. Programování složitých aplikací s natolik redukovanou instrukční sadou není snadné ani efektivní.

PIC16F872 má k dispozici 2k míst pro instrukční slovo o délce 14 bitů. V kombinaci s redukovanou instrukční sadou je množství paměti limitující pro implementaci systému jako je regulátor otáček BLDC motoru. Ani paměť RAM nedisponuje nadbytkem volného místa, PIC16F872 má 128 B paměti pro ukládání běhových informací. Pro perzistentní data je k dispozici 64 B EEPROM.

Další detaily mikrokontroléru PIC16F872 uvedu jen ve shrnutí, bez vyjmenování vlivů na realizaci regulátoru otáček zmíněných již dříve. PIC16F872 má časovače s podporou 10 b přesnosti PWM, 8 bitový A/D převodník s možností přepínání 5 vstupů, rozhraní pro komunikaci SPI a TWI. Chybí vnitřní komparátor a možnost komunikace po standardním UART rozhraní.

I přes velmi omezenou instrukční sadu je PIC16F872 druhý nejvhodnější kandidát na mikrokontrolér pro řízení regulátoru otáček. Obsahuje obtížně nahraditelné periferie (A/D převodník, ISP programování, komunikační rozhraní). Pokud by se připojily externí komparátory, bylo by použití PIC16F872 možné. Ve stejné cenové kategorii lze však využít lépe vybavený a levnější mikrokontrolér ATmega8.

### 4.3 Zapojení mikrokontroléru ATmega8

Z analýzy schopností dostupných mikrokontrolérů vyšel vítězně mikrokontrolér firmy Atmel ATmega8. Vzhledem k návaznosti zde již nebudu opakovat vlastnosti zvoleného mikrokontroléru, ani schéma jeho zapojení, které je uvedeno v celkovém schématu A.1 v příloze.

### 4.3.1 Porty

ATMega 8 má 20 obecných vstupně výstupních linek sdílených s periferiemi a dvě čisté vstupní analogové linky. S ohledem na sdílení linek periferiemi musíme nejprve vhodně zapojit tyto linky.

Vstupně výstupní linky jsou rozděleny do tří portů - B, C a D. Postupně budou rozepsány speciální funkce jednotlivých vývodů mikrokontroléru (význam zkratk je k dispozici v [3]), informaci zda je funkce periferie využita pro chod regulátoru či programovací režim a zvolené přiřazení v regulátoru otáček. Zdůvodnění vybraného zapojení následuje pod každým rozepsaným portem.

Port B	Funkce	Využito	Zapojení v regulátoru
PB0	ICP	Ne	řízení silové části
PB1	OCR1A	Ne	řízení silové části
PB2	OCR1B	Ne	řízení silové části
PB3	MOSI	Prog	vstup řídicích tlačítek, ISP programování
PB4	MISO	Prog	vstup řídicích tlačítek, ISP programování
PB5	SCK	Prog	vstup řídicích tlačítek, ISP programování

Tabulka 4.1: Obsazení portu B.

Funkce vývodů PB0-PB2 jsou sdíleny s časovačem č. 1. PB0 má funkci zachycení vstupní události, tzv. input capture, která nemá v regulátoru využití a je proto použita pro ovládání silové části. PB1-PB2 jsou propojeny s hardwarovým generováním jednobukletového PWM signálu. Jelikož však potřebujeme generovat 3 nezávislé kanály, je nutné generovat PWM pomocí softwaru a proto jsou vývody propojeny na silovou část bez využití speciální funkce.

PB3-PB5 jsou sdíleny periferií SPI, která je použita pouze při programování mikrokontroléru v obvodu (ISP). Jedinou podmínkou aby fungovalo ISP programování je, že hardwaru cílového zařízení nesmí ovlivňovat úroveň definované programátorem. Proto jsem na tyto vstupy umístil ovládací tlačítka, která v rozepnutém stavu neovlivňují programování mikrokontroléru.

Port C	Funkce	Využito	Zapojení v regulátoru
PC0	ADC	Ano	snímání velikosti průměrného proudu motoru
PC1	ADC	Ano	snímání okamžitého proudu motoru
PC2	ADC	Ano	snímání velikosti napájecího napětí
PC3	ADC	Ano	fázové napětí - A
PC4	ADC	Ano	fázové napětí - B
PC5	ADC	Ano	fázové napětí - C
PC6	pouze ADC !	Ano	snímání 5 V napájení CPU
PC7	pouze ADC !	Ano	snímání teploty regulátoru

Tabulka 4.2: Obsazení portu C.

Vývody PC0-PC7 jsou sdílené s analogovými periferiemi ADC převodníku a komparátoru. V regulátoru s výhodou využijeme všech analogových kanálů, a zapojení bylo provedeno jen s ohledem na fyzickou lokalizaci vývodů na pouzdru mikrokontroléru.

Na porty PD0-PD1 byly zapojeny pouze signalizační LED diody. Tím je umožněno jejich využití jak k signalizaci, pokud nepožadujeme komunikaci regulátoru s nadřazeným systémem, tak ke komunikaci. Signalizační LED neporuší úroveň TTL UART komunikace.

Port D	Funkce	Využito	Zapojení v regulátoru
PD0	RX0	Možné	signalizační LED
PD1	TX0	Možné	signalizační LED
PD2	INT0	Možné	nezapojeno, možnost využít pro total stop
PD3	INT1	Ano	tlačítko vypnutí/zapnutí
PD4	T0	Ne	ovládání silové části
PD5	T1	Ne	ovládání silové části
PD6	AIN0	Ano	napětí umělého středu motoru
PD7	AIN1	Ne	ovládání silové části

Tabulka 4.3: Obsazení portu D.

Porty PD2-PD3 umožňují vyvolat přerušení a rychle zpracovávat asynchronní události. Na přerušení s nižší prioritou jsem připojil ovládací tlačítko pro spuštění a zastavení motoru, tím je zajištěna nejrychlejší možná reakce systému. Přerušení vyšší priority jsem ponechal nezapojeno, s možností zapojení rychlého hardwarového odpojení - tzv. total stop. Funkci total stop může zastávat tlačítko, nouzové dorazové spínače a podobně.

Porty PD4-PD5 mají funkci čítače, kterou v regulátoru také nevyužijeme, jsou proto použity na řízení silové části regulátoru.

Porty PD6-PD7 jsou sdíleny s invertujícím a neinvertujícím vstupem komparátoru. Port PD6 je pevně spojen s neinvertujícím vstupem komparátoru a proto je sem přivedeno napětí středního bodu motoru. Invertující vstup komparátoru lze sdílet s ADC multiplexerem a přepínat tak pomocí programu jeho vstupy, což v regulátoru využíváme. Port PD7 tak ztrácí svou původní funkci a lze jej využít jako obecný vstup/výstup a poslední chybějící ovládací signál pro silovou elektroniku (6 nutných).

### 4.3.2 Podpůrné obvody

Mimo korektní zapojení portů vyžaduje mikrokontrolér pro svůj provoz korektní zapojení napájení jádra a A/D převodníku, krystal a resetovací obvod.

Ze zdroje máme napájecí napětí dostatečně stabilní a vhodné pro přímé napájení, jak jádra a periferií mikrokontroléru, tak jeho A/D převodníku.

Pracovní kmitočet mikrokontroléru je daný námi zvoleným krystalem, a ATmega8 je schopna pracovat v celém rozsahu 0-20 MHz. Jelikož jsem měl k dispozici pouze verzi ATmega8L je maximální použitelný kmitočet 8 MHz. Procesor ATmega8L je však schopen funkce až do 2,8 V napájecího napětí a lépe tak reaguje na krizové stavy běžné při ladění chyb v kódu. Ladění se provádí na napájecím zdroji s proudovou pojistkou.

Resetovací obvod pro korektní naběhnutí mikrokontroléru je zapojení doporučené výrobcem a není důvod ho nikterak upravovat. Použil jsem standardní zapojení pro ATMegu8[3].

## 4.4 Silové obvody

Silové obvody regulátoru reagují na řídicí TTL signály mikrokontroléru, a v závislosti na nich spínají kladnou či zápornou větev napájecího napětí na příslušné fáze motoru.

Protože spínáme nízké stejnosměrné napětí, omezuje se nám výběr spínacích prvků na bipolární a unipolární tranzistory. Pro každou fázi je nutno použít dva spínací prvky pro spínání kladného a záporného napájecího napětí o shodném nebo rozdílném typu vodivosti (komplementární zapojení).

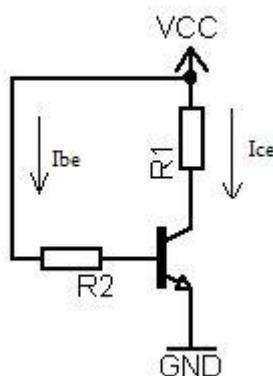
Tabulkovou formou shrneme výhody a nevýhody jednotlivých zapojení.

Zapojení	Klady	Zápory
Bipolární, komplementární	snadné, levné řízení	nízká proudová zatížitelnost
Bipolární, shodná vodivost	žádné další výhody	nízká proudová zatížitelnost, složitější řízení
Unipolární, komplementární	relativně snadné řízení, vyšší dostupné proudy	horší parametry tranzistorů vodivosti P
Unipolární, shodná vodivost	velká proudová zatížitelnost	složitě řídicí obvody

Tabulka 4.4: Srovnání spínacích prvků.

#### 4.4.1 Bipolární tranzistory

Bipolární tranzistory jsou tranzistory řízené proudem do/z jejich řídicí elektrody (báze). Pro řízení proudu protékajícího tranzistorem se používají v zapojení se společným emitorem. V tomto zapojení se v závislosti na proudu řídicí elektrody (báze - emitor) řídí velikost maximálního protékajícího proudu obvodu kolektor - emitor. Řízený proud je několikanásobně vyšší, než proud řídicí a tranzistor funguje jako zesilovač.



Obrázek 4.4: Tranzistor jako zesilovač.

Zesílení tranzistoru je definováno katalogovým parametrem  $h_{21E}$ , který definuje proudové zesílení tranzistoru nakrátko. Zesilovací činitel se tedy mění s napětím (kolektor-emitor).

V regulátoru otáček BLDC motoru používáme tranzistor pouze jako spínač. Vzhledem k protékajícím proudům v řádu desítek i stovek ampér není lineární řízení tranzistoru možné. Jelikož na tranzistoru vzniká jistý úbytek napětí, spolu s protékajícím proudem vytváří ztrátové teplo dle vzorce  $P = U * I$ .

Proto řídíme dodávaný výkon do motoru pomocí PWM modulace a tranzistory spínáme do režimu saturace (tzn. plného sepnutí). Problém proč se bipolární tranzistory příliš nepoužívají, je nízký zesilovací činitel výkonových verzí a vysoký úbytek napětí v sepnutém stavu. Výkonové bipolární tranzistory se obvykle vyrábějí pro vyšší napětí (desítky až stovky voltů) a nižší proudy (pouze jednotky ampér), než vyhovuje regulátoru otáček BLDC motoru.



Příkladem může být výkonový NPN tranzistor BD911 [11], který by byl dostatečný pro výkonový stupeň regulátoru pro malé motorky. Tranzistor dovoluje maximální spínané napětí  $U_{CEmax} = 100V$ . BLDC motory však bývají napájeny ze zdrojů stejnosměrného napětí 24 V a méně. Maximální proud  $I_{CE} = 15A$ . Proud 15 A dostačuje pro motory o výkonu do 125 W, což není mnoho (je nutné počítat s rozběhovou proudovou špičkou).

Tranzistor BD911 má zesilovací činitel  $h_{21E} = 15$ . To tedy znamená, že pro jeho saturaci musíme dodat do báze minimálně 1 A! Je zřejmé, že bude nutné pro sepnutí tranzistoru použít další tranzistor ve formě předzesilovače, proud 1 A není schopen dodat žádný mikrokontrolér nebo TTL obvod přímo. To je hlavní důvod, proč se bipolární tranzistory nevyužívají pro koncové stupně ve spínacím režimu.

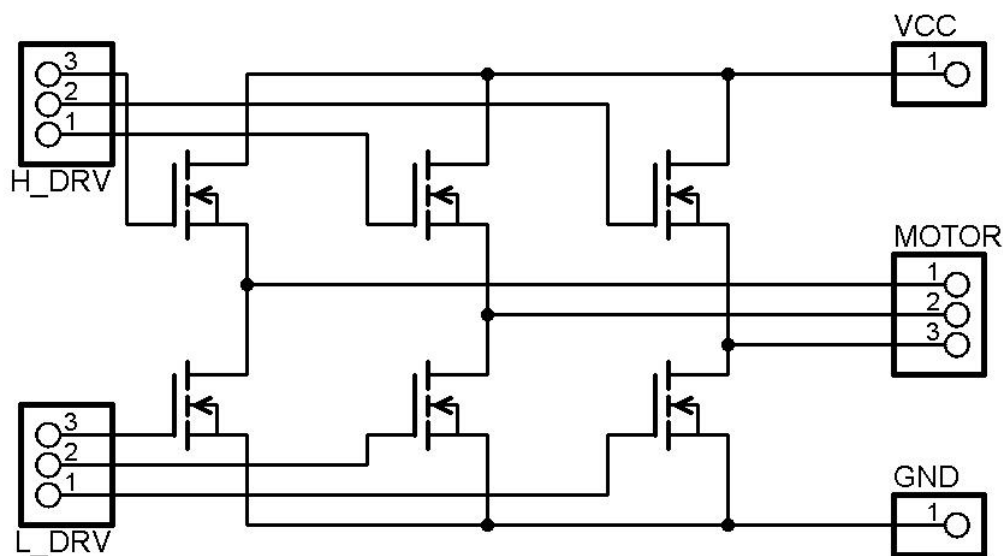
Mezi NPN a PNP bipolárními tranzistory není z elektrického hlediska významný rozdíl, proto zde nemá smysl uvažovat koncový stupeň bez komplementárních tranzistorů. Princip spínání výkonového stupně s bipolárními komplementárními tranzistory zde nebudu popisovat, bipolární tranzistory nebudou v regulátoru použity.

#### 4.4.2 Unipolární tranzistory

Unipolární tranzistory jsou řízeny přiloženým napětím na jejich řídicí elektrodu (gate). Řídicí elektroda má charakter čistě kapacitní zátěže, a po jejím nabití na požadované napětí neodebírá řídicí elektroda žádný proud. Odpadá tím hlavní nevýhoda bipolárních tranzistorů v jejich potřebě přidavných zesilovacích stupňů mezi řídicím mikrokontrolérem a koncovým stupněm.

Problém vyvstává v nerovnováze mezi elektrickými parametry N-MOSFET tranzistorů a P-MOSFET tranzistorů. Tranzistory P-MOSFET mají výrazně horší elektrické parametry než N-MOSFET a vůbec se nevyrábí pro vyšší povolené proudy. To poněkud komplikuje řízení výkonového stupně jak bude zmíněno dále.

Schéma výkonového stupně s N-MOSFET tranzistory je na obrázku 4.5.



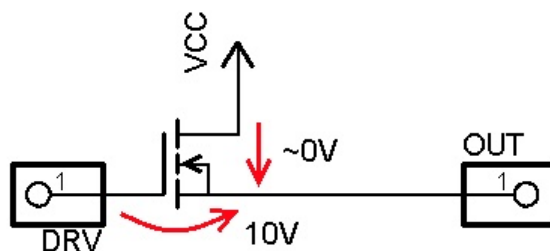
Obrázek 4.5: Koncový stupeň s N-MOSFET tranzistory.

Jelikož jsou tranzistory N-MOSFET saturovány do sepnutého stavu při 10 V na vstupu, je nutné pro jejich spínání 10 V ze zdroje napájecího napětí, jak bylo zmíněno v sekci



napájecího zdroje. Spínání záporného pólu zdroje se tak provádí připojením 10 V na řídicí elektrodu tranzistoru, který chceme sepnout. Není to sice možné přímo výstupem mikrokontroléru, ale nejde o nijak složitý elektronický obvod.

Problém představuje spínání kladného pólu zdroje. Spínací napětí pro korektní sepnutí N-MOSFET tranzistoru je 10 V *oproti napětí na elektrodě S!* To znamená že tranzistory spínající kladný pól napájecího napětí je nutno spínat napětím o 10 V vyšším, než je napětí fáze motoru, přičemž napětí fáze motoru během spínání kladného pólu stoupá až na napětí napájecí! Tranzistor tedy musí být sepnutý napětím o 10 V vyšším než je napětí napájecí a situaci neřeší ani 10 V zdroj (4.6).

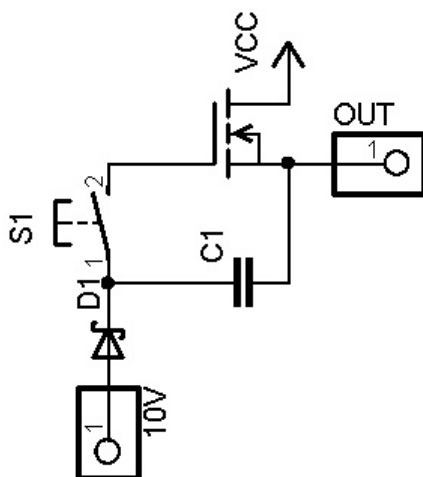


Obrázek 4.6: Spínání N-MOSFETu v kladné větvi.

Zde je nutno využít skutečnosti, že řídicí elektroda (gate) má charakter čistě kapacitní zátěže, a využívá se pro spínání PWM modulace. I v případě 100 % PWM modulace se na fázi přepíná kladný a záporný pól díky komutacím a žádný z N-MOSFET tranzistorů kladné větve není sepnutý delší dobu.

Pokud nabijeme kondenzátor na hodnotu napětí 10 V a toto napětí odpojíme, udrží si kondenzátor tento náboj po určitou dobu, ovlivněnou hodnotou jeho vnitřního odporu. Po jistém časovém úseku kondenzátor náboj ztratí vlivem samovybíjení, je proto nutné náboj periodicky obnovovat.

Pomocí kondenzátoru s dostatečně nízkou hodnotou svodového proudu můžeme spínání N-MOSFET tranzistoru vyřešit zapojením s takzvaným bootstrap kondenzátorem. Princip naznačuje schéma 4.7



Obrázek 4.7: Spínání N-MOSFETu bootstrap kondenzátorem.

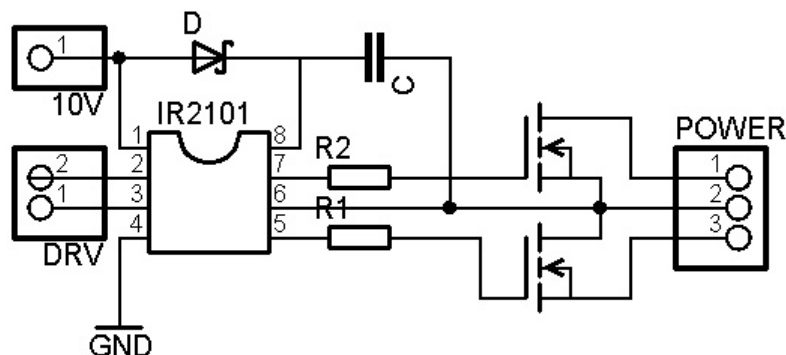
Princip funkce obvodu je následující. V základním stavu je spínač S1 rozepnutý, tranzistor N-MOSFET nevede a na výstupu je 0 V. Kondenzátor C1 se nabíjí přes diodu D1 na 10 V ze zdroje napětí. Napětí na kondenzátoru dosáhne 10 V během několika málo mikrosekund a obvod je připraven k sepnutí tranzistoru.

Sepnutím spínače S1 připojíme 10 V napětí na kondenzátoru k řídicí elektrodě tranzistoru a ten se začne otvírat. Současně s jeho otvíráním klesá úbytek mezi elektrodami kanálu a napětí výstupu stoupá. Jelikož je kondenzátor připojen mezi výstup a řídicí elektrodu tranzistoru, neustále udržuje dostatečné napětí řídicí elektrody a uzavřená dioda D1 nedovolí vyššímu napětí proniknout zpět do 10 V zdroje.

Tranzistor sepne do plného otevření, na výstupu je napětí  $V_{cc}$  a na řídicí elektrodě tranzistoru  $V_{cc} + 10$  V. Kondenzátor není dobýjen ze žádného zdroje napětí a vlivem svodových proudů jeho napětí zvolna klesá. V žádném případě nesmíme překročit časovou hranici, kdy napětí na kondenzátoru klesne na cca 8 V. Tranzistor se začne přivírat, úbytek napětí na kanálu tranzistoru se zvýší a vzniklá tepelná ztráta tranzistor zničí. Proto musíme kondenzátor volit s ohledem na maximální dobu sepnutí tranzistoru, kterou vyžadujeme.

Rozepnutím spínače S1 klesne napětí na řídicí elektrodě tranzistoru, ten se uzavře, výstupní napětí klesne na nulu a kondenzátor přes diodu D1 obnoví svůj náboj. Celý cyklus se tak může opakovat. Celý obvod je nakreslen mírně zjednodušeně, řídicí elektrodu tranzistoru je nutné po odpojení spínače S1 vybit co nejrychleji kvůli tepelným ztrátám při přechodu tranzistoru přes lineární režim, a také výstup je nutno sepnout tranzistorem pro spínání záporného pólu zdroje pro korektní dobítí kondenzátoru. Spínač S1 je nutno vytvořit elektronický, ovladatelný TTL signálem mikrokontroléru.

Pro řízení spínání N-MOSFET můstků jsou proto navrženy integrované obvody, tzv. hi and low N-MOSFET drivery. Pro regulátor otáček jsem vybral obvod IR2101 [12]. Jde o integrovaný obvod schopný přímého řízení jedné fáze regulátoru otáček TTL signálem. Obvod zároveň zajišťuje ochranu před nechtěným sepnutím obou řízených tranzistorů fáze (4.8).



Obrázek 4.8: IR2101 N-MOSFET driver.

Pro tři fáze regulátoru otáček BLDC motoru musí být obvod 4.8 použit třikrát. Výběr N-MOSFET tranzistorů není kritický, jsou použitelné jakékoliv tranzistory s dostatečnou proudovou, napěťovou a výkonovou zatížitelností pro použitý motor.

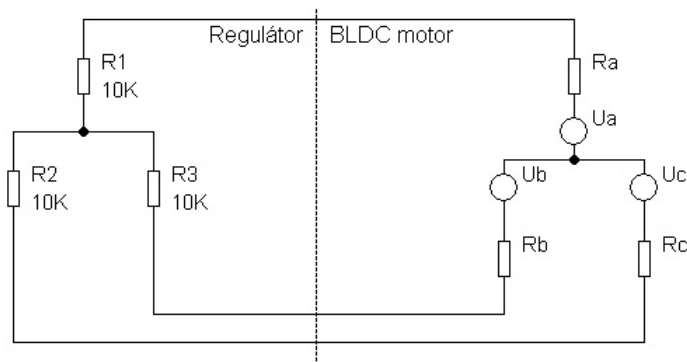
## 4.5 Zpětné vazby

Pro korektní snímání zpětných vazeb potřebujeme mimo fázová napětí znát také napětí středního bodu motoru. Tento bod není možné vyvést u motorů zapojených do trojúhelníku a nebývá vyveden ani u motorů zapojených do hvězdy.

Existují dva způsoby, jak zjistit napětí středního bodu. První z nich je matematický výpočet ze znalosti fázových napětí. Je nutné snímat fázové vodiče A/D převodníkem mikrokontroléru a provádět matematický výpočet. Zatímco samotný výpočet zvládnou i osmibitové mikrokontroléry bez obtíží, dostatečnou vzorkovací rychlost A/D převodníku nemá žádný z vybrané kategorie mikrokontrolérů.

Druhou variantou je vytvoření středního bodu motoru v hardwaru regulátoru z fázového napětí všech tří fází. Základ principu vychází ze zjednodušeného náhradního schématu BLDC motoru.

Schéma celkového obvodu detekce zpětných vazeb spolu s připojeným BLDC motorem je na obrázku 4.9. Obvod umožňuje "výpočet" napětí středního bodu motoru v hardwaru.



Obrázek 4.9: Obvod pro snímání zpětné vazby.

Jak je zřejmé ze schématu, k fázovým vodičům motoru je připojena na straně regulátoru rezistorová síť. Tato síť je uspořádána stejně, jako cívky vinutí motoru a jejich vnitřní odpory.

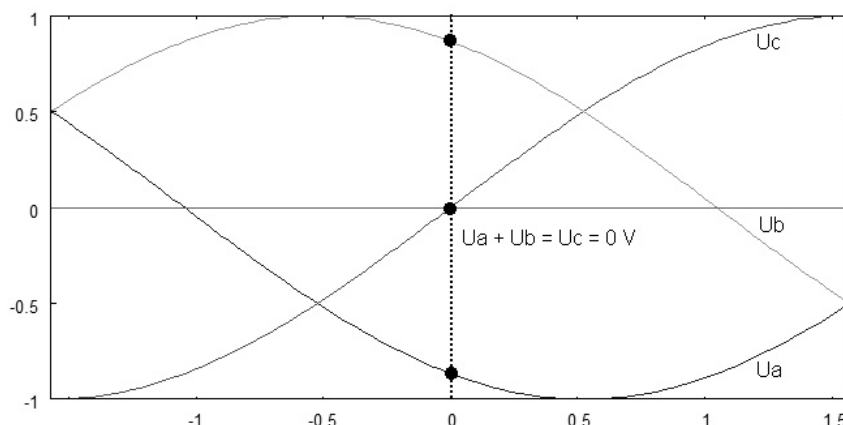
Lze předpokládat, že elektrický odpor všech vinutí motoru má přibližně stejnou hodnotu. Přiložíme-li jakékoliv externí napětí na fáze motoru v klidu (napětí  $U_a$ ,  $U_b$  a  $U_c$  jsou nulová, motor se neotáčí), napětí se rozloží na jednotlivé cívky vinutí motoru dle Ohmova zákona  $U = I * R$ .

Lze dokázat, že pokud jsou napětí zdrojů zpětného elektromotorického napětí  $U_a$ ,  $U_b$  a  $U_c$  nulová, přiložené napětí na fáze motoru se shodně rozloží mezi vinutí  $R_a$ ,  $R_b$  a  $R_c$  i rezistory  $R_1$ ,  $R_2$  a  $R_3$ . Analogicky jsou tak napětí středního bodu uvnitř vinutí BLDC motoru a středního bodu rezistorů v regulátoru otáček shodná.

Znalost absolutní hodnoty elektrického odporu vinutí není nutná. Absolutní hodnota elektrického odporu vinutí ovlivňuje pouze množství protékajícího proudu vinutím, avšak nemá žádný vliv na rozložení napětí a hodnotu napětí středního bodu vinutí motoru.

Účelem obvodu však není měření středního bodu vinutí motoru v jeho klidu, ale za jeho provozu, v době, kdy se BLDC motor otáčí. Napětí  $U_a$ ,  $U_b$  a  $U_c$  není za běhu motoru nadále nulové.

Pro regulátor otáček je podstatný okamžik, kdy napětí fázového vývodu motoru proti střednímu bodu vinutí mění svou polaritu, tedy průchod napětí nulou. Graf průběhů fázových



Obrázek 4.10: Detailní průběh napětí generovaného BLDC motorem

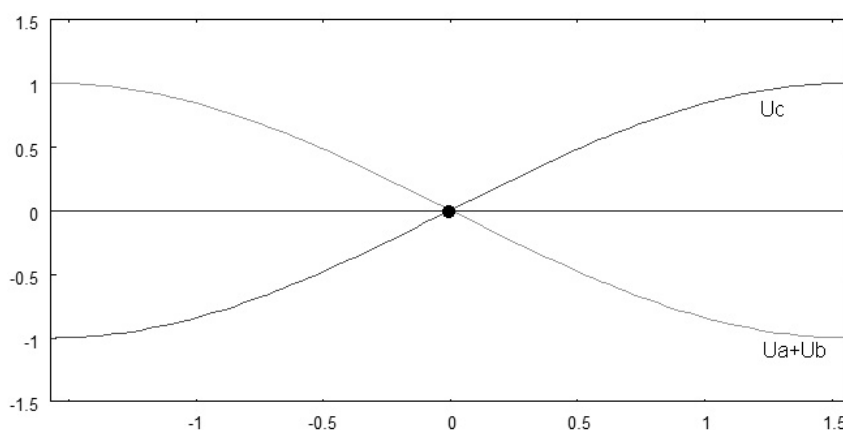
napětí otáčejícího se BLDC motoru je na obrázku 4.10. Jednotlivé průběhy přímo vyznačují hodnoty napětí zdrojů zpětného elektromotorického napětí  $U_a$ ,  $U_b$  a  $U_c$ .

Cílem obvodu tedy je, aby napětí mezi fázovým vývodem motoru a středním bodem motoru změnilo svou polaritu ve stejný okamžik, jako shodné fázové napětí proti středu odporové sítě regulátoru otáček a to bez ohledu na velikost napětí  $U_a$ ,  $U_b$  a  $U_c$ .

Předpokládejme, že je připojeno externí napětí napájecího zdroje na vývody motoru A a B, a očekáváme změnu napětí na fázovém vývodu C. Situace je zvýrazněna v grafu 4.10.

V bodě, který hledáme, je napětí zdroje  $U_c$  téměř nulové, a nijak nezvyšuje rozdíl mezi napětím středního bodu BLDC motoru a středního bodu rezistorové sítě.

Napětí zdrojů  $U_a$ ,  $U_b$  sice není nulové, ale *má shodnou velikost s opačnou polaritou!* Situace je jasnější na grafu 4.11. Výsledné součtové napětí ovlivňující rozdíl mezi středním bodem motoru a středním bodem rezistorové sítě je v nás požadovaném okamžiku nulové.



Obrázek 4.11: Detailní průběh napětí generovaného BLDC motorem

Nulový součet zpětného elektromotorického napětí  $U_a$ ,  $U_b$  a  $U_c$  neplatí pouze při průchodu některého napětí nulou, ale platí po celou dobu běhu motoru. V každý okamžik tak známe hodnotu středního bodu motoru, ovlivněnou pouze eventuální diferencí elektrického odporu vinutí motoru.

## 4.6 Shrnutí

V sekci hardwaru se podařilo úspěšně vyřešit všechny problémy spojené s realizací jednotlivých bloků hardwaru, nalezení vhodných součástek, jejich propojení a společnou funkci. Pro regulátor otáček BLDC motoru byl navržen stabilní zdroj napájecího napětí, zvolen řídicí mikrokontrolér ATmega8 a jeho zapojení, silový spínací obvod složený z N-MOSFET tranzistorů a obvod pro snímání zpětných vazeb.

Výsledné celkové schéma regulátoru je uvedeno v příloze, na obrázku číslo **A.1** v příloze.

## Kapitola 5

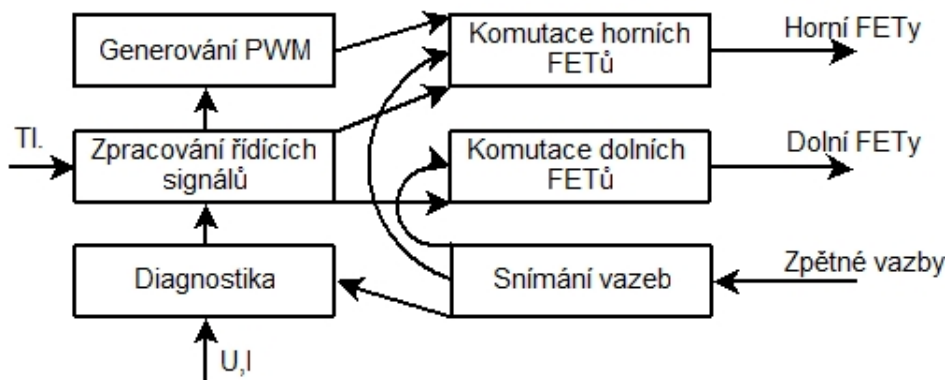
# Software

Sekce software popisuje implementovaný řídicí software regulátoru otáček BLDC motoru. Výsledný kód je implementován v assembleru mikrokontroléru ATmega8. Regulátor byl vyvíjen a kompilován pomocí volně šiřitelného vývojového prostředí firmy Atmel – AVRStudio.

Sekce obsahuje odkazy do souborů zdrojového kódu. Zdrojové kódy jsou k dispozici na CD přiloženém k originálu diplomové práce a nejsou přímou součástí dokumentu.

### 5.1 Architektura

Funkce regulátoru otáček BLDC motoru jsou rozděleny do šesti základních bloků se specifickou funkcí (obr. 5.1).



Obrázek 5.1: Blokové schéma regulátoru.

Základní částí je blok zpracování řídicích signálů. Blok nastavuje v závislosti na aktuálním vstupu uživatele a diagnostických údajích o provozu motoru množství energie, které generuje blok PWM signálu a cestu, kudy je energie dodávána do motoru (komutace horních a dolních FETů).

Blok diagnostiky snímá běhové parametry regulátoru a udržuje jejich hodnotu v paměti RAM pro informaci uživatele a bloku zpracování řídicích signálů. Zejména se jedná o měření aktuálních proudů, napětí a stavu zpětné vazby od BLDC motoru.

Blok generování PWM signálu se stará o množství energie dodané do motoru v závislosti na aktuálním stavu a požadavku uživatele. V taktu PWM signálu je spínáno pouze kladné

napětí. Spínání kladného napětí v taktu PWM je výhodné pro korektní dobíjení bootstrap kondenzátorů.

Bloky komutace horních a dolních FETů distribuuji energii dodávanou napájecím zdrojem na fázové vinutí motoru v závislosti na aktuální poloze rotoru vůči statoru.

Blok snímání zpětných vazeb zajišťuje filtraci signálu generovaného komparátorem obvodu zpětných vazeb a vysílá signály pro komutaci BLDC motoru do bloku zpracování řídicích signálů.

## 5.2 Diagnostika

Diagnostické systémy regulátoru otáček lze rozdělit na dvě části. První částí je pasivní měření běhových parametrů regulátoru, druhou pak aktivní systém pro ochranu hardwaru regulátoru. Částečně mimo toto rozdělení je hlídání zpětných vazeb.

### 5.2.1 Pasivní měření

Subsystem pasivního měření běhových parametrů regulátoru je asynchronně aktivován přerušením od volně běžícího A/D převodníku (soubor *irq.asm*, rutina *irq\_ad*).

Zpracování měřených dat a přepínání měřicích kanálů je obsluhováno synchronně během prodlevy mezi komutacemi BLDC motoru (soubor *rutiny.asm*, rutina *processAD*).

Během provozu regulátor neustále měří dostupné veličiny, průměruje jednotlivá měření a výsledek zapisuje do paměti RAM mikrokontroléru. Data jsou dostupná pro případné využití uživatelem.

Naměřená data s přesností 2 byty jsou k dispozici na návěštích deklarovaných v souboru zdrojového kódu *data.asm*. Data snímaná mikrokontrolérem jsou průměrována z osmi vzorků.

- *unow* - aktuální napětí zdroje
- *imax* - okamžitý proud fáze
- *inow* - střední hodnota odběru proudu
- *tempnow* - aktuální teplota spínacích FETů regulátoru.

Mimo veličiny snímané A/D převodníkem regulátor měří přesnou hodnotu komutační periody. Dle vzorce  $RPM_{now} = 6 / \text{komutacniPerioda}$  lze vypočítat hodnotu aktuálních elektrických otáček BLDC motoru za jednu minutu.

Měření komutační periody je synchronní, řešené rutinou *merper* (soubor *rutiny.asm*). Rutina *merper* je spouštěna periodicky po každé komutaci BLDC motoru. Komutační perioda je měřena nejen pro informaci uživatele či nadřazeného systému, ale také pro účel rozběhu motoru. Stojící BLDC motor negeneruje žádné zpětné elektromotorické napětí a nelze tedy určit jeho polohu. Regulátor využívá časového limitu pro komutace v případě, kdy nedostává signál od BLDC motoru. Rozběh motoru bude detailněji rozebrán v 5.5.

### 5.2.2 Aktivní ochrana

Aktivní ochranu tvoří obslužná rutina přerušení externího vstupu s nejvyšší prioritou *INT0* *irq\_emg* (soubor *irq.asm*). Na externí vstup přerušení je přiveden úbytek napětí způsobený protékajícím proudem silové části přes měřící odpory.

Stoupne-li proud nad únosnou mez, vzroste také úbytek na měřicích odporech v záporném přívodu napájecího napětí silové části, dojde k aktivaci obslužné rutiny a ta okamžitě deaktivuje spínací tranzistory. V dalším cyklu PWM signálu je však opětné sepnutí možné. Dochází tak k aktivnímu omezování šířky PWM pulzů na možnosti silové jednotky regulátoru.

Spolu s monitorováním teploty silové části (detekce dlouhodobého mírného nadproudu) je možné regulátor komplexně chránit před přetížením. Proti přímému zkratu však ochrana neexistuje, energie akumulovaná v kondenzátorech a proud, který jsou schopny dodat výkonné Li-Pol baterie, zničí tranzistory silové části dříve, než může dojít k jejich opětovnému rozepnutí.

## 5.3 Snímání zpětných vazeb

Snímání zpětných vazeb je nejdůležitější částí regulátoru BLDC motoru. Snímání zpětných vazeb umožňuje korektní komutaci BLDC motoru a jeho udržení v chodu.

V sekci hardwaru byl úspěšně vyřešen problém realizace obvodu pro přivedení požadovaného fázového napětí a napětí středního bodu na komparátor mikrokontroléru. V programu je nutné filtrovat signál, který dodává komparátor v závislosti na aktuálním stavu.

V praxi bylo zjištěno, že nelze použít shodný algoritmus pro fázi rozběhu, kdy motor stojí, či se otáčí velmi pomalu a pro stavy vyšších provozních otáček. Rozložíme tedy algoritmus na dvě části a systém přechodu mezi těmito částmi. Obě části jsou implementovány rutinou *sense* v souboru *rutiny.asm*.

### 5.3.1 Fáze rozběhu

Stav systému ve fázi rozběhu nejlépe charakterizuje obrázek 2.11. BLDC motor se ve stavu rozběhu neotáčí, nebo otáčí velmi zvolna. Generované BEMF napětí má nízkou amplitudu a v bodech aktivace PWM pulzu je zcela nedetekovatelné.

Při detekci průchodu nulou dochází k chybám, průchod nulou často vůbec nezaregistrujeme (v případě stojícího motoru nikdy), nebo je naopak detekováno doznění proudového impulsu PWM signálu jako zpětná vazba.

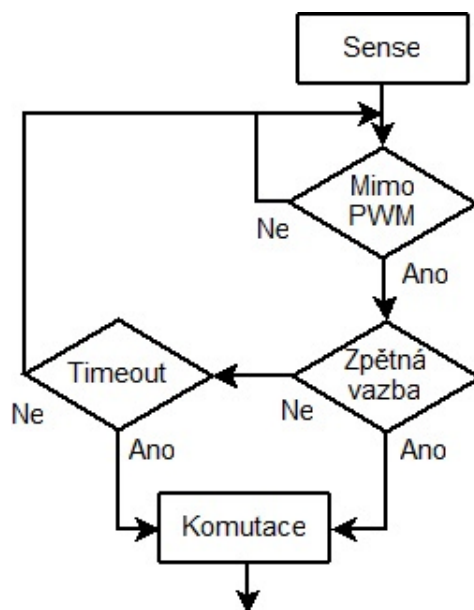
Pro detekci v rozběhové fázi byl zvolen algoritmus zobrazený diagramem 5.2.

Jak bylo zmíněno dříve, je velikost napětí BEMF u pomalu běžícího BLDC motoru velmi malá, a přechodové jevy spojené se zapínáním a vypínáním PWM signálu zcela zamaskují případný průchod nulou. Proto v rozběhové fázi detektor zpětné vazby čeká, až bude zcela mimo PWM pulz. S tím je spojena nutnost omezit maximální množství dodané energie do motoru, aby zbýval dostatek času na detekci zpětné vazby mimo pulzy PWM. Omezení PWM bude rozebráno dále v sekci generování PWM. Je zřejmé, že algoritmus použitý ve fázi rozběhu nelze použít ve fázi běhu, kde je široký pulz PWM a neexistuje oblast dostatečně vzdálená od deaktivace PWM pulzu.

Poměr šířky PWM pulzu a komutační periody ve fázi rozběhu není problémem, během komutační periody proběhne řádově několik desítek cyklů PWM modulace. Jinak je tomu v případě běhu motoru, kdy se maximální dosažitelné otáčky blíží šířce PWM pulzu a detekce mimo pulz by nebyla dostatečně přesná.

Aby došlo k rozběhu stojícího BLDC motoru, je nutné vykonat sérii komutací bez zpětné vazby pro rozechvení rotoru. Proto je algoritmus hledání zpětných vazeb v rozběhové fázi doplněn časovačem s timeoutem, který generuje komutace s kmitočtem cca 5 Hz i v případě, že žádná zpětná vazba nebyla detekována. To umožní rozběh stojícího BLDC motoru.





Obrázek 5.2: Algoritmus hledání zpětné vazby při rozběhu.

Rozechvřený rotor BLDC motoru začíná generovat BEMF napětí a začíná docházet k detekci zpětné vazby v korektní okamžik. S každou korektní komutací dostává motor impuls k roztočení žadaným směrem, což zvyšuje rychlost otáčení, stoupá napětí BEMF a pravděpodobnost korektní komutace.

Komutace pomocí vypršení časovače s rostoucím počtem otáček BLDC motoru ubývají, až zmizí zcela. Od počtu korektních komutací se řídí přechod do fáze běhu. Teprve když je detekováno 255 po sobě jdoucích korektních komutací bez vypršení časovače, dojde k přepnutí zvoleného algoritmu pro detekci zpětných vazeb a povolení zvýšení šířky PWM pulzů až do plného sepnutí.

Algoritmus pro hledání zpětné vazby v plném sepnutí musí být schopen detekce BEMF napětí i při neustálé dodávce elektrické energie zdroje do otáčejícího se motoru, bez ohledu na PWM modulaci.

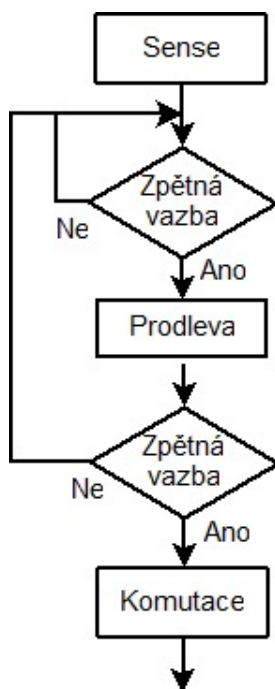
### 5.3.2 Fáze běhu

Fáze běhu je charakterizována dostatečným napětím BEMF pro komutace motoru a PWM signálem s širokým pulzem, eventuálně v plném sepnutí.

Komutace BLDC motoru v plném běhu je jednodušší než ve fázi rozběhu. V navrženém algoritmu se lze spolehnout na korektní nalezení zpětné vazby (zřejmé z průběhu BEMF), je však třeba ošetřit zákmitý v oblasti průchodu nulou, aby nedošlo k předčasné komutaci.

Zatímco ve fázi rozběhu není nekorektní komutace kritická a běžné k ní dochází, při nízkých dodávaných energiích nemá destruktivní vliv. Nekorektní komutace v plném sepnutí může způsobit fyzické poškození motoru i regulátoru otáček elektrickým impulsem a setrvačnými silami v motoru.

Zpětnou vazbu proto průměrujeme ze dvou vzorků s prodlevou mezi vzorky úměrnou maximální rychlosti otáčení, kterou je možné s navrženým regulátorem dosáhnout.



Obrázek 5.3: Algoritmus hledání zpětné vazby při běhu.

Přechod zpět do fáze rozběhu proběhne při zastavení motoru. V případě příliš proměnlivé zátěže na hřídeli motoru lze implementovat přechod do fáze rozběhu v závislosti na poklesu aktuálních otáček BLDC motoru.

Navržené algoritmy jsou vhodné pro běh s nízkou zátěží na hřídeli motoru. Pokud by byl regulátor otáček BLDC motoru použit v zařízení s jiným charakterem zátěže, je vhodné navržené algoritmy optimalizovat na cílový systém.

Systémy s velmi vysokou rozběhovou zátěží na hřídeli BLDC motoru nelze metodou zpětných vazeb řídit. Motor je nutné osadit enkodérem a řídit v závislosti na signálu enkodéru.

## 5.4 Generování PWM

Mikrokontrolér ATmega8 má dva hardwarové kanály pro generování PWM modulace. Regulátor otáček BLDC motoru má však specifické požadavky na generování PWM - jsou vyžadovány tři kanály, přičemž PWM modulace je generována v danou dobu pouze na jeden kanál. Všechny tři kanály používají shodnou šířku pulzu a k přepínání kanálů může teoreticky docházet vícekrát během jediného PWM pulzu. PWM modulaci je tedy nutné generovat pomocí softwaru.

Mikrokontrolér ATmega8 umožňuje využít oddělené přerušovací kanály pro korektní generování PWM modulace pomocí softwaru. Rutiny pro aktivaci a deaktivaci PWM pulzu (rutiny *irq\_pwdown* a *irq\_pwup*, soubor *irq.asm*) jsou implementovány odděleně a spouštěny přerušovacím systémem ATMegy8.

Problém, který bylo nutno vyřešit, je nedeterministické chování systému, pokud je mezi vyvoláním obou přerušování nedostatečný odstup. Díky interakcím s ostatními přerušovacími kanály dochází při nedostatečném odstupu k porušení časování či dokonce prohození pořadí

volání rutin. Situace nastává, pokud obslužná rutina jiného přerušení překryje dobu aktivace obou kanálů. Místo pořadí, v jakém byly aktivovány, se použije pevná prioritní hierarchie ATMegy8 a obslužné rutiny se zavolají v závislosti na prioritách.

Nedostatečný odstup vzniká při nízkých šířkách PWM pulzu (deaktivace přichází těsně po aktivaci) a při vysokých šířkách pulzu (aktivace přichází těsně po deaktivaci). Proto byla ve volbě šířky pulzu dodatečně doprogramována nelinearita. Generátor PWM modulace tak přechází z 0 % na 5 % a z 95 % na 100 % skokově. Skok realizujeme deaktivací funkce jedné z rutin. Při 100 % PWM tak vůbec nedochází k deaktivaci pulzu, stejně tak při 0 % nedochází k aktivaci. Díky nelinearitě se tak vyhýbáme oblastem, kde může docházet k nekorektnímu chování.

Implementovaná nelinearita nemá zásadní vliv na plynulost regulace otáček BLDC motoru. Skoková změna spodní hranice urychluje rozběh BLDC motoru, na horní hranici pak skok nepředstavuje zásadní změnu v otáčení díky setrvačnosti roztočeného BLDC motoru.

Pro korektní rozběh motoru je nutné omezit maximální dodanou energii do motoru. Pokud je regulátor otáček ve fázi rozběhu, modul generování PWM nedodává vyšší šířku PWM pulzu než je 20 %. Zpětná vazba z motoru je v bloku rozběhu detekována na úrovni 40 % PWM pulzu, tím je zaručena filtrace přechodových jevů aktivace, průběhu a deaktivace napájení motoru.

## 5.5 Komutace

Bloky komutací horních a dolních FETů zajišťují spínání správných větví silové elektroniky v závislosti na zpětných vazbách motoru.

Blok komutace dolních FETů zajišťuje připojení záporného pólu motoru na správnou fázi motoru. Záporný pól se spíná trvale, vždy na dobu mezi dvěma komutacemi (přepínání horních a dolních FETů se střídá). V případě aktivace brzdy je po zastavení otáčení motor uzamčen do zkratu sepnutím všech tří fází na záporném bodu zdroje. Jelikož se BLDC motor chová jako generátor, pokud jím otáčíme vnější silou, zkratováním jeho fází dosáhneme dynamického brzdění motoru.

Blok komutace horních FETů zajišťuje spínání kladného pólu zdroje na správnou fázi motoru podobně jako blok komutace dolních FETů, avšak navíc je sepnutí horních FETů modulováno PWM signálem pro řízení dodávané energie do motoru.

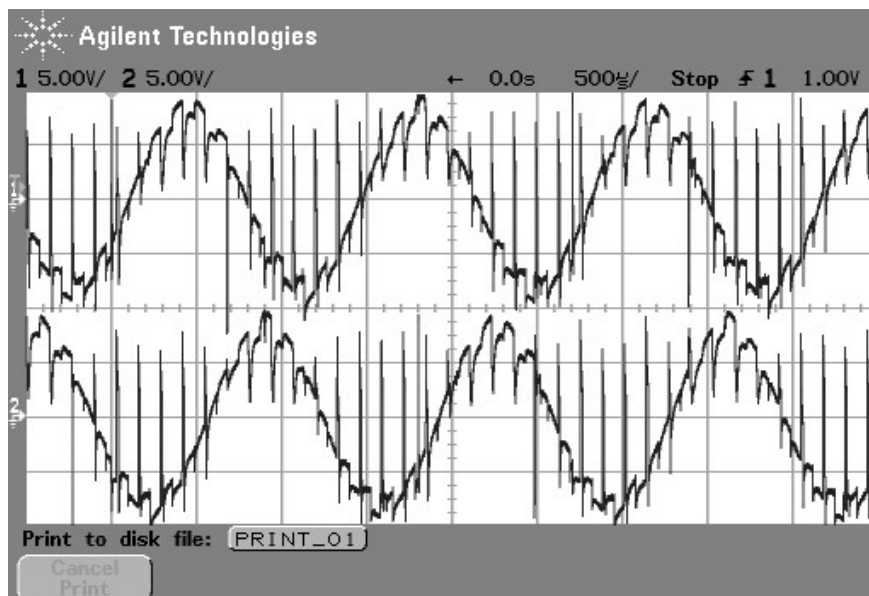
Modulace horních FETů PWM signálem nebyla zvolena náhodně. Jak již bylo zmíněno v kapitole Hardware, jsou horní FETy schopny sepnutí pouze na omezenou dobu, jelikož jsou spínány pomocí bootstrap kondenzátorů. Ve fázi rozběhu, kdy je komutační perioda velmi dlouhá, by docházelo k poklesu spínacího napětí na řídicích elektrodách FETů. Pokles napětí řídicí elektrody způsobuje snížení vodivosti FETu, zvýšení napětového úbytku, množství tepla generovaného kanálem FETu až k destrukci spínacího prvku.

Během rozběhu, kdy není 100 % PWM signál a trvalé sepnutí horních FETů, se bootstrap kondenzátory periodicky dobíjí s kmitočtem PWM modulace (8 kHz). Při maximálním dodaném výkonu, kdy jsou horní FETy sepnuté trvale, je komutační perioda řádově menší než ve fázi rozběhu a bootstrap kondenzátory udrží dostatečné napětí na řídicích elektrodách na potřebnou dobu.

Průběh spínání FETů během otáčení motoru je zobrazen na obrázku 5.4.

Kmitočet PWM modulace byl zvolen experimentálně. Pro většinu běžných BLDC (ale i stejnosměrných motorů) se využívá kmitočtu 8 kHz.

Spínací kmitočet PWM je kompromisem mezi nízkými kmitočty, kdy dochází k vysokým proudovým rázům díky dlouhé době aplikace plného napájecího napětí a vysokým



Obrázek 5.4: Průběh spínání silové části.

kmitočtem, kdy zvyšujeme počet hran PWM signálu za jednotku času. Spínací hrany, kdy tranzistor FET přechází přes lineární režim, nejvíce ohřívají spínací tranzistory, a s rostoucím kmitočtem tak roste tepelná ztráta spínací části.

Pro nízkoindukční motory se strmým náběhem proudu vinutím může být 8 kHz příliš nízká hodnota. Snadno lze úpravou režimu časovače mikrokontroléru ATmega8 dosáhnout 16 či 32 kHz kmitočtu PWM, což je dostatečné i pro jednozávitové nízkoindukční motory. Na vysoké kmitočty pak musíme předdimenzovat chlazení silové části.

Ve zdrojovém kódu je blok komutací FETů reprezentován hlavními řídicími smyčkami, které jsou přepínány v závislosti na požadavku uživatele. Hlavní smyčka běhu motoru je představována cyklem od návěští *beh* v souboru *regulator.asm*. Smyčka pro aktivní brzdění motoru a jeho uzamknutí po zastavení je reprezentována cyklem od návěští *brzda* v souboru *regulator.asm*.

## 5.6 Řízení

Blok řízení není reprezentován konkrétní rutinou. Řízení představuje synchronní kód, distribuovaný mezi obě hlavní smyčky a také do rutin snímání zpětné vazby či výpočtu komutační periody.

Hlavní funkcí bloku řízení je snímat stav ovládacích tlačítek a stav systému reprezentovaný systémovými registry, a v závislosti na aktuálním stavu systému ovlivňovat řídicí proměnné a ovládat tok řízení.

### 5.6.1 Snímání uživatelských tlačítek

První funkcí bloku řízení je periodické snímání a vyhodnocení vstupu uživatele. Uživatel má k dispozici čtyři ovládací tlačítka s funkcemi spuštění motoru, aktivace brzdy, snížení a zvýšení šířky PWM pulzu.

Tlačítka snížení a zvýšení šířky PWM regulují množství dodané energie do motoru. Regulátor otáček si pamatuje nastavené množství energie mezi jednotlivými běhy motoru, mezi jednotlivými zapnutími však ne. Po vypnutí a zapnutí nastaví regulátor minimální množství energie a to z důvodů zaručení bezpečnosti při prezentaci regulátoru. Rutiny pro uložení nastavené hodnoty do EEPROM mikrokontroléru jsou nachystány a funkční.

Tlačítko spuštění motoru funguje monostabilně, také z důvodů bezpečnostních. Po dobu stisku tlačítka motor běží.

Tlačítko brzdy funguje pouze pokud je brzda povolena uživatelem, viz kapitola 5.5. Po jeho stisku motor plynule zabrzdí a zůstane blokován až do dalšího spuštění.

### 5.6.2 Akcelerace, decelerace, PWM

V závislosti na stavu regulátoru a požadavku uživatele obsluhuje řídicí blok akceleraci a deceleraci motoru při stisku tlačítka spuštění motoru.

Řídicí blok obsluhuje hodnoty požadované PWM (*pwmneedl*, *pwmneedh*) a aktuální (*pwm*, *pwmh*). Pomocí systémového časovače mikrokontroléru ATmega8 číslo 2 zajišťuje regulátor plynulou akceleraci, pokud stav systému umožňuje zvýšení aktuální PWM a okamžitou deceleraci v případě požadavku na zastavení (zpomalení).

Dle požadavků na aplikaci regulátoru lze vytvořit jak plynulou akceleraci, tak deceleraci, nebo měnit rychlost akcelerace/decelerace pomocí volby děliče časovače č.2. Pokud by byla požadována jemnější regulace rychlosti, lze přerušení aktivující výpočet aktuální PWM (přerušení *irq\_rampa*, rutina *processPWM*) přesunout z kanálu přetečení časovače č.2 na kanál výstupní komparace časovače č.2.

Drobnou změnou rutiny *processPWM* můžeme snadno změnit řízení s konstantní dodávkou energie na řízení s konstantními otáčkami. Stačí pouze hodnotu aktuální PWM vypočítat z rozdílu požadované komutační periody a nastavené komutační periody (D-regulátor), či na jakékoliv jiné řízení, založené na známých veličinách v paměti RAM regulátoru.

### 5.6.3 Komunikační možnosti

Navržený regulátor má poměrně široké komunikační schopnosti, využitelné v případě ovládání regulátoru nadřazeným programovatelným řídicím systémem místo přímého ovládání uživatelem.

Linky, kam jsou připojeny ovládací tlačítka, jsou vyvedeny na externí konektor na těle regulátoru, a je tak možné simulovat stisky tlačítek, či změnit ovládání na jiný systém aktivace úrovněmi signálu TTL (šířka pulzu, perioda pulzů...).

Pokud požadujeme plnohodnotné komunikační rozhraní, tvoří linky řídicích tlačítek rozhraní SPI pro rychlou komunikaci na velmi krátké vzdálenosti. Kvůli nedostatku I/O linek a využití linky SS na jiné účely je použití SPI omezeno na provoz regulátoru v režimu master.

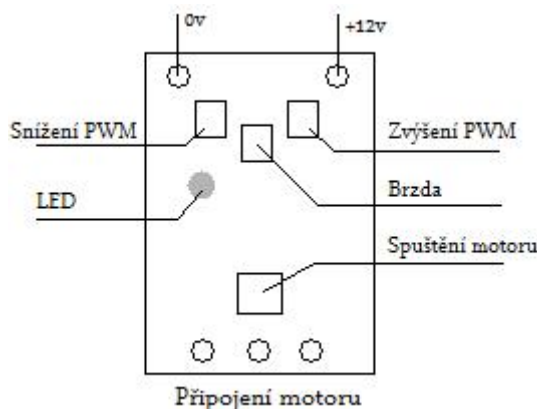
Další možností je přímá komunikace 5 V TTL linkou UART. Na pinech mikrokontroléru sdílených periférií UART jsou zapojeny signalizační LED diody, což však v případě potřeby UART komunikace nepředstavuje překážku pro datovou komunikaci. V případě příliš velkých deformací průběhů signálu linky UART je možno signalizační diody zcela odpojit.

Poslední možností řízení navrženého regulátoru je řízení analogovým signálem 0-5 V. Pro toto řízení není rezervován žádný z A/D kanálů mikrokontroléru ATmega8. Všechny dostupné kanály jsou využity pro měření stavových veličin regulátoru, v případě potřeby řízení analogovým signálem (či diferencí analogových signálů) je však možné odpojit ty

měřicí kanály, které v dané aplikaci vyžadujeme nejméně, a použít uvolněné analogové vstupy pro řízení regulátoru otáček BLDC motoru.

## 5.7 Ovládání

Navržený regulátor má s ohledem na prezentaci velmi jednoduché uživatelské rozhraní, sestávající ze čtyř tlačítek a dvou stavových LED diod. Rozmístění ovládacích prvků na DPS je naznačeno na obrázku 5.5.



Obrázek 5.5: Ovládání regulátoru otáček BLDC motoru.

Regulátor je nutné napájet ze zdroje stejnosměrného napětí 12-15 V s proudovou zatížitelností úměrnou připojenému motoru. Motor připojujeme VŽDY ve stavu bez napětí.

V závislosti na napájecím zdroji je možno povolit použití motorové brzdy. Motorovou brzdou lze použít pouze tehdy, je-li regulátor napájen z napájecího zdroje schopného absorbovat energii dodanou regulátorem. Bez výjimky nelze brzdou použít při napájení ze síťového zdroje. Naopak, použijeme-li baterii dobíjecích článků, lze motorovou brzdou vždy použít.

Připojíme-li regulátor na napájecí napětí, aniž bychom drželi stisklé tlačítko brzdy, regulátor ohlásí bliknutím zelené LED a pípnutím motoru, že je aktivní v režimu bez brzdy a připraven ke spuštění motoru.

Pokud při připojení napájecího napětí držíme tlačítko brzdy, regulátor blikne červenou LED a pípnutím motoru oznámí připravenost k běhu. Svítí-li po připojení regulátoru na napájecí napětí červená LED trvale, je připojení napětí nedostatečné pro běh regulátoru (nižší než 11 V).

Je-li při startu regulátoru omylem stisknuto tlačítko spuštění motoru, regulátor vyčkává na jeho uvolnění aby nedošlo ke zranění obsluhy nečekaným rozběhem motoru.

Motor spouštíme stisknutím a držením tlačítka spuštění motoru. Při stisknutém tlačítku běhu motoru lze stiskem tlačítek zvyšování a snižování PWM upravovat množství dodávané energie do motoru. Po uvolnění tlačítka běhu motoru lze tlačítkem brzdy aktivovat brzdící režim, pokud byl povolen při spuštění regulátoru.

Stisknutím brzdy motor plynule zabrzdí a zůstane zabrzděný až do následujícího stisku tlačítka běhu motoru. Tlačítko brzdy není nutné držet stisknuté, po jeho stisku je brzda aktivní bez ohledu na následující stav až do opětovného spuštění motoru.

Regulátor se vypíná odpojením od napájecího napětí zdroje.

# Kapitola 6

## Závěr

### 6.1 Aplikace BLDC pohonů

Z pohonu dříve využívaného pouze v hobby oblasti se stává v několika posledních letech perspektivní pohon pro oblast průmyslu. BLDC motory vynikají velmi vysokou spolehlivostí, kompaktností a bezúdržbovou konstrukcí. Jejich cena neustále klesá vlivem zvyšování objemu výroby a technologie se neustále zdokonaluje.

Ruku v ruce se snižováním ceny BLDC motorů jde zdokonalování technologie výroby elektrických článků. Mnoho zařízení je dnes možno napájet velmi výkonnými a kompaktními zdroji elektrické energie, které jsou schopny dodat relativně nízké stejnosměrné napětí o vysoké proudové zatížitelnosti. Právě tato zařízení jsou vhodná pro nasazení BLDC motorů. Vytvářet střídavé napájecí napětí sinusového průběhu pro synchronní či asynchronní střídavé motory je neefektivní a náročné. Stejnosměrné motory vyžadují údržbu komutátoru a uhlíků, která vyžaduje zásah autorizovaného servisu.

BLDC motory otevřely cestu pro hybridní pohony v automobilovém průmyslu, výrobu elektrických kol, skútrů či obecně pohonů spolehlivějších, bezúdržbových a lehčích při stejném výkonu. U kritických systémů jsme schopni kontrolovat a diagnostikovat pohon, řídicí regulátor otáček může být schopen velmi sofistikovaného řízení v závislosti na požadavcích uživatele.

Pro standardní případy, kde neklademe na řízení BLDC motoru zvláštní nároky, a vyžadujeme pouze regulaci výkonu dodávaného do motoru, existují integrované řadiče BLDC motoru pro senzorové i bezsenzorové řízení (MC33395, ML4425, MC33033 ...).

Pro situace, kde vyžadujeme složitější řízení, zpětnou vazbu či diagnostiku pohonu, byl v diplomové práci navržen univerzální regulátor otáček BLDC motoru, vystavěný na standardní dostupné součástkové základně, včetně řídicího mikrokontroléru.

### 6.2 Zhodnocení a odchylky implementovaného řešení

Navržený regulátor otáček BLDC motoru splňuje všechny cíle, které byly vytyčeny v úvodu diplomové práce. Regulátor je univerzální, schopný řídit širokou škálu BLDC motorů s výkonovým a napěťovým omezením daným pouze použitými spínacími unipolárními tranzistory silové části.

Rozběh běžných BLDC motorů s žádnou až nízkou zátěží je bezproblémový, regulátor však nedosahuje univerzálnosti komerčních řešení. V případě použití netradičních či zvláštních

BLDC motorů (velmi nízká indukčnost, nesymetrické odezvy motoru...) by bylo nutné uvedený regulátor upravit na míru zvoleného řešení.

Při praktické implementaci hardwaru a softwaru došlo k několika odchylkám od navrženého schématu. Pro jednoduchost byl vypuštěn zdvojovač napájecího napětí. Napětí 10 V je získáno přímo před monolitickým stabilizátorem LE50 a přivedeno na řídicí obvody silové části IR2101. Proto bylo nutné zvýšit minimální napájecí napětí z cca 7 V na 11 V.

Pro vyšší výkonovou zatížitelnost byly spínací tranzistory silové části zdvojeny, každou z šesti větví tak spíná dvojice tranzistorů.

Regulátor otáček BLDC motoru byl testován při maximu 20 000 otáček za minutu. BLDC motor se točil bez problémů, vyšší hodnotu otáček jsem neměl možnost otestovat.

Po odladění vývojových chyb pracoval regulátor při testech korektně, mimo obtíže při rozběhu motoru s poškozeným magnetickým obvodem z jistých poloh jeho rotoru.

Regulátor vytvořený v diplomové práci představuje univerzální a využitelný základ pro praktické aplikace v dalších projektech. Po jeho úpravě či zdokonalení je možné jeho využití pro pohon robotů, řízení systémů s přesnými otáčkami či diagnostikou.



# Literatura

- [1] Atmel Corporation. *AT89C2051 datasheet*. Atmel Corporation, 2005.
- [2] Atmel Corporation. *ATMega16 datasheet*. Atmel Corporation, 2006.
- [3] Atmel Corporation. *ATMega8 datasheet*. Atmel Corporation, 2006.
- [4] Atmel Corporation. *ATTiny2313 datasheet*. Atmel Corporation, 2006.
- [5] Atmel Corporation. *AVR435: BLDC/BLAC Motor Control Using a Sinus Modulated PWM Algorithm*. Atmel Corporation, 2006.
- [6] Atmel Corporation. *AVR493: Sensorless Commutation of Brushless DC Motor (BLDC) using AT90PWM3 and ATAVRMC100*. Atmel Corporation, 2006.
- [7] GM Electronic. <http://www.gme.cz>.
- [8] GES Electronics. <http://www.ges.cz>.
- [9] Josef Hrázský. *Mikropočítače a počítače 2*. Informatorium Praha, 1996. ISBN 80-8542-792-3.
- [10] David Matoušek. *Práce s mikrokontroléry Atmel AVR*. BEN - Technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-088-1.
- [11] ST Microelectronics. *BD911 datasheet*. ST Microelectronics, 1999.
- [12] International Rectifier. *IR2101 datasheet*. International Rectifier, 2004.
- [13] Ota Roubíček. *Elektrické motory a pohony*. BEN - Technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-092-X.
- [14] Freescale semiconductor. *MC68HC908QY4 datasheet*. Freescale semiconductor, 2005.
- [15] Freescale Semiconductors. *3-Phase BLDC Motor with Hall Sensors and Speed Closed Loop, Driven by eTPU on MCF523x*. Freescale Semiconductors, 2005.
- [16] WWW stránky. *Wikipedia: Brushless DC electric motor*.
- [17] Microchip technology. *PIC16F872 datasheet*. Microchip technology, 2006.

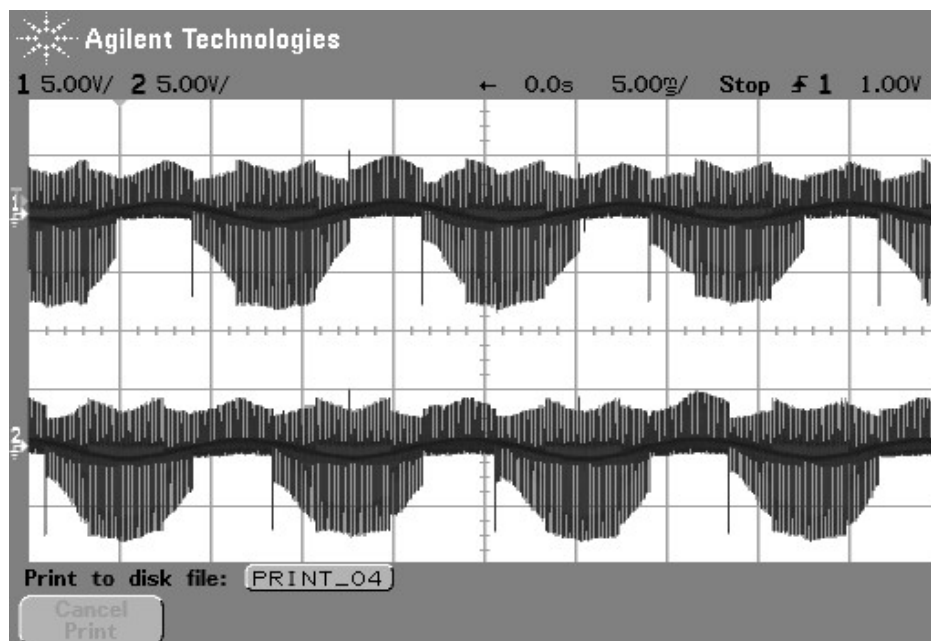
## Dodatek A

## Příloha

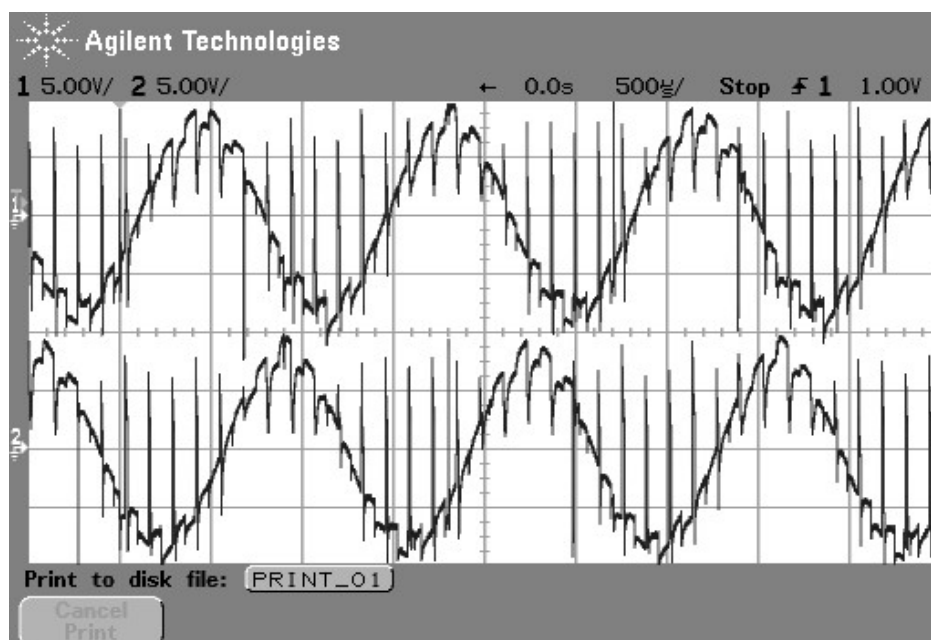
Technické údaje	
Hardware	
Řídící mikrokontrolér	Atmel ATmega8L
Řadič 3f můstku	3x IR2101
Spínací tranzistory	12x N-MOSFET IR7832
Software	
Implementační jazyk	assembler rodiny Atmel AVR
Velikost zdrojového kódu	25,7 kB
Velikost kódu mikrokontroléru	1,42 kB
Technické parametry	
Minimální provozní napětí	11 V
Maximální provozní napětí	24 V
Maximální trvalý proud	30 A
Maximální rozběhový proud	50 A max. 10 sec
Maximální provozní teplota	90 stupňů C
Maximální provozní otáčky	více než 20 000 ot./min.

Tabulka A.1: Technické parametry regulátoru.

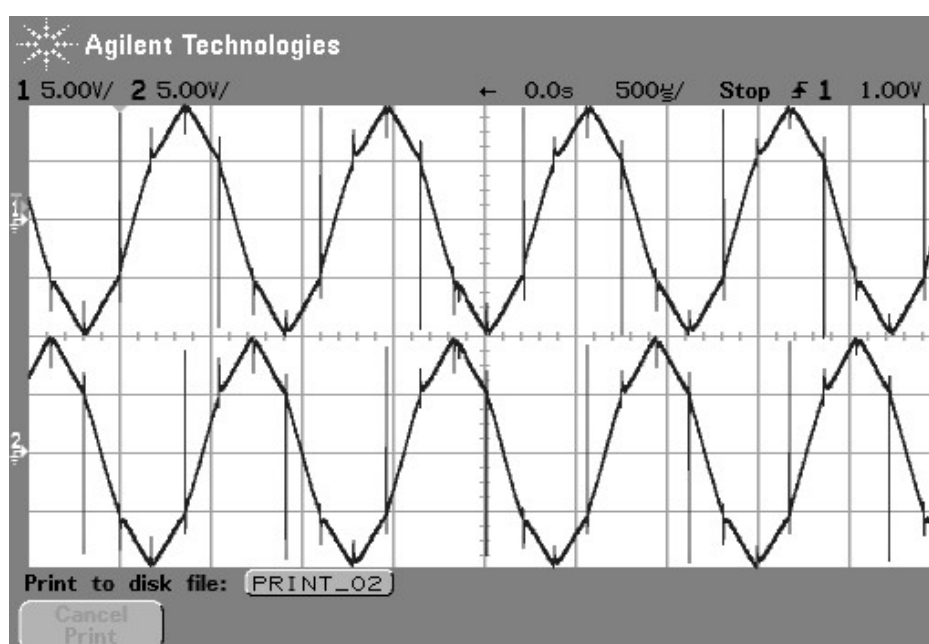




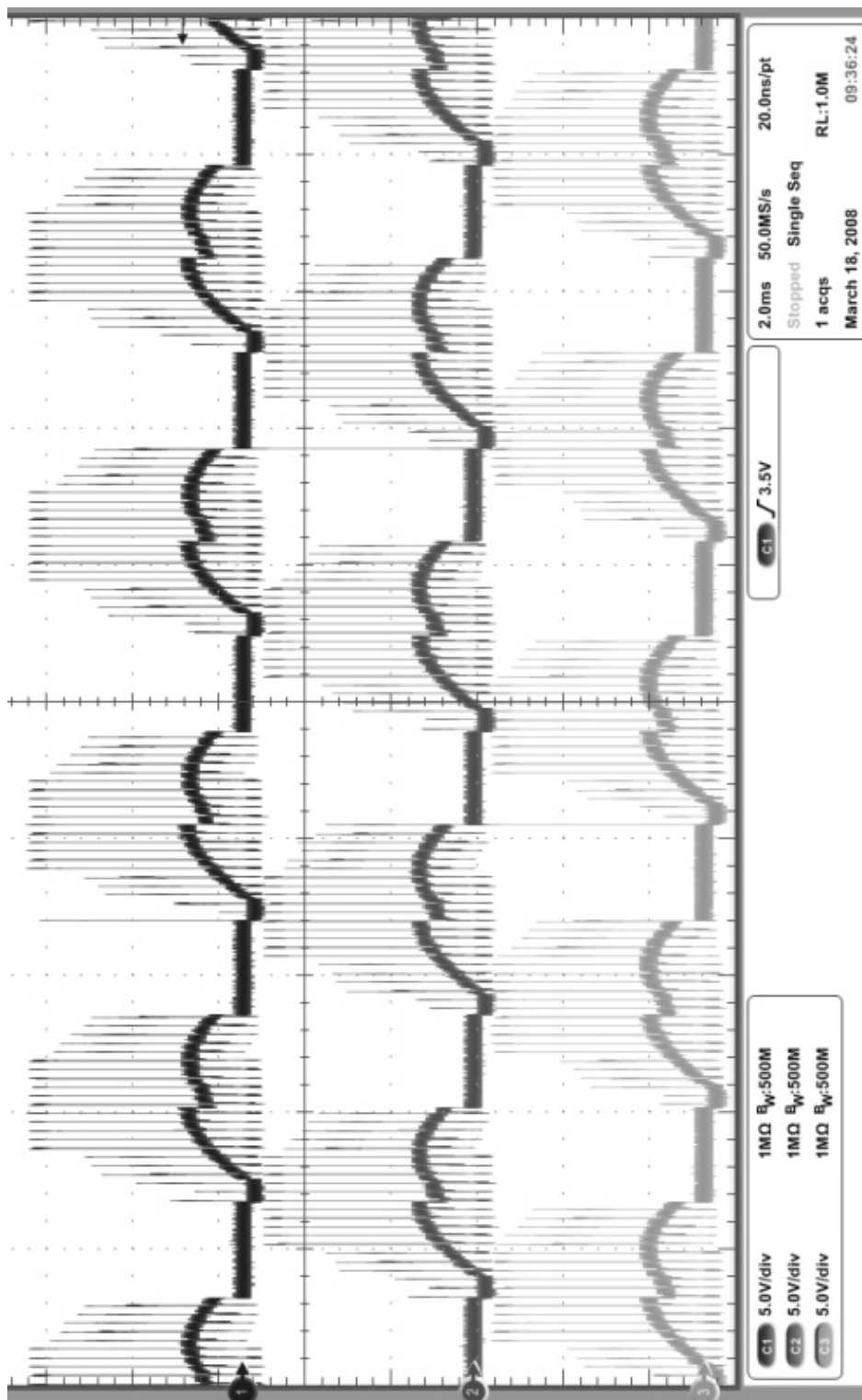
Obrázek A.2: Signál pro komparátor pomalu běžícího BLDC motoru



Obrázek A.3: Signál pro komparátor běžícího BLDC motoru, 80% PWM



Obrázek A.4: Signál pro komparátor běžícího BLDC motoru, plný plyn



Obrázek A.5: Signál tří fází běžícího motoru